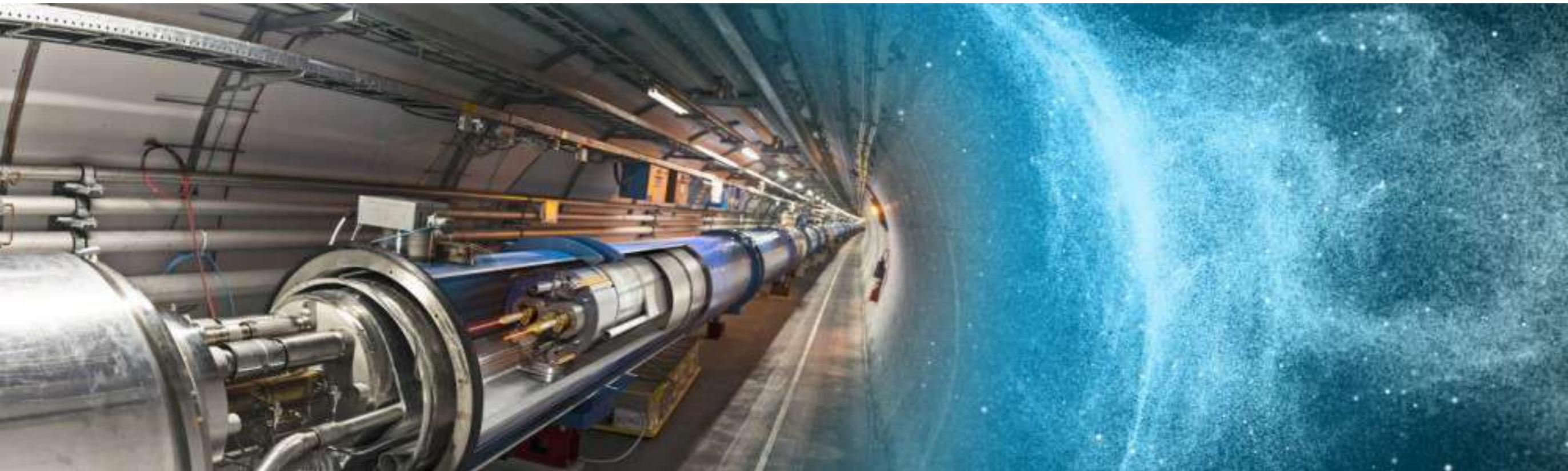




Misura della vita media del mesone D^0

Marco Santimaria / Masterclass Internazionale 06.03.2025 - LNF



Eventi di collisione a LHCb

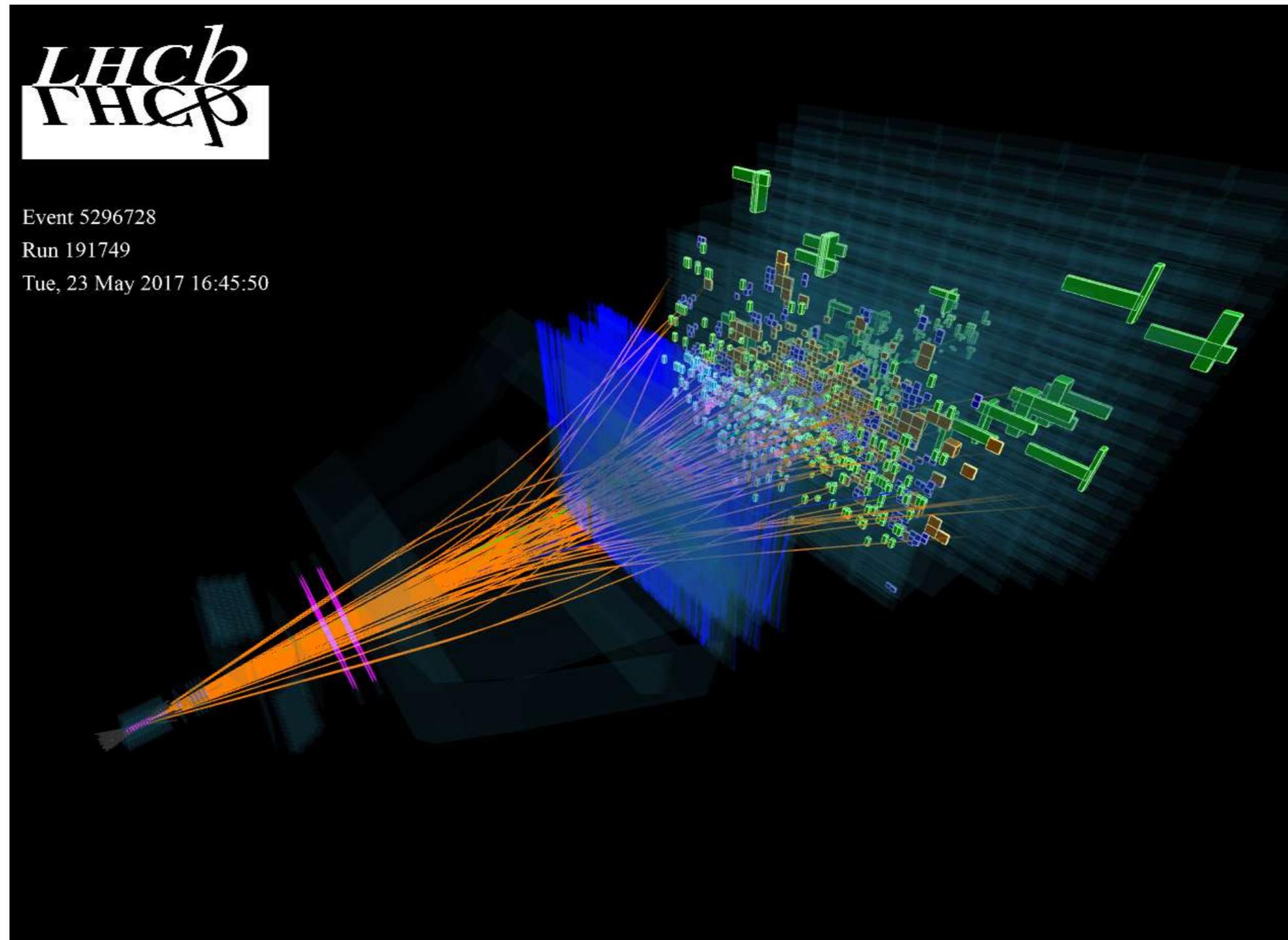
I protoni di LHC si scontrano in LHCb e generano molte particelle, tra cui i mesoni D^0 .
Come cerchiamo gli eventi interessanti?

Con milioni di eventi
al secondo e
centinaia di tracce?

Trigger

Con 30 eventi?

A mano!

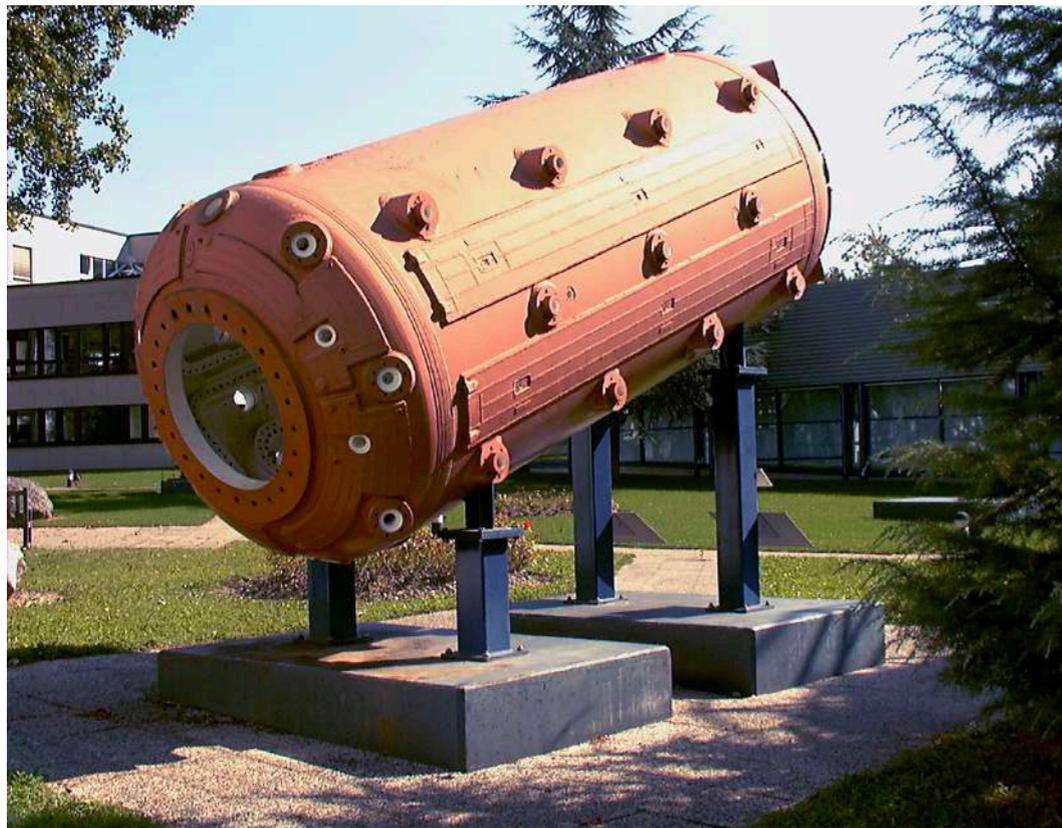


Physics like it's 1972!

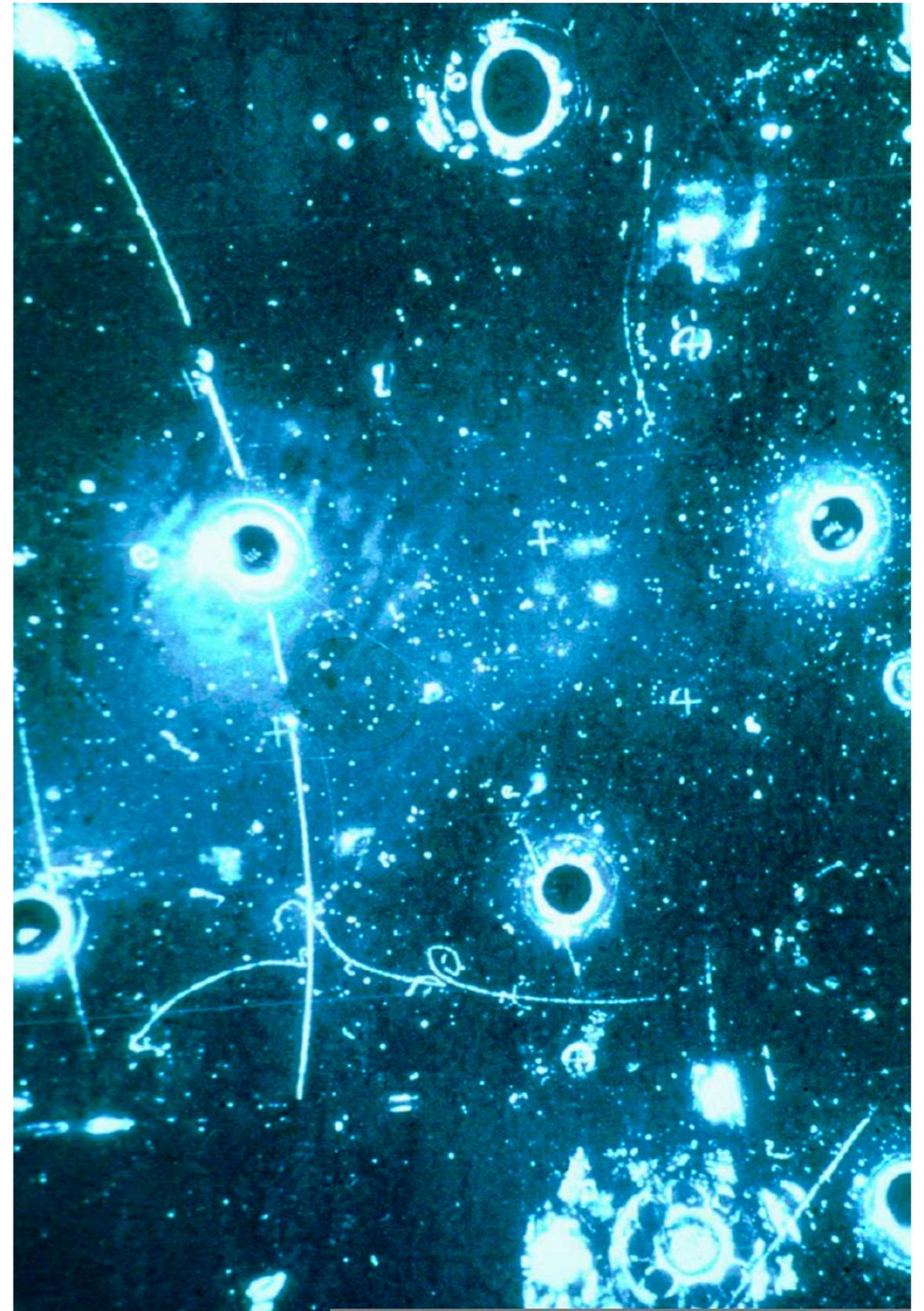
Una volta era proprio così che si faceva:
analizzare delle fotografie una per una ...



...2 MESONI! Però è valso un Nobel!



La camera a bolle "Gargamelle" al CERN



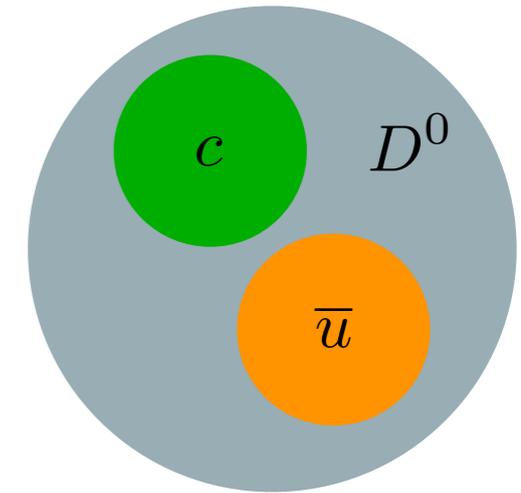
“Scanning girls”



<https://cern70.cern/tracing-particles/>

Il mesone D^0

Un mesone D^0 è formato da un quark **charm** (c) e un quark **anti-up** (\bar{u})



Dal “Particle Data Group” (PDG):

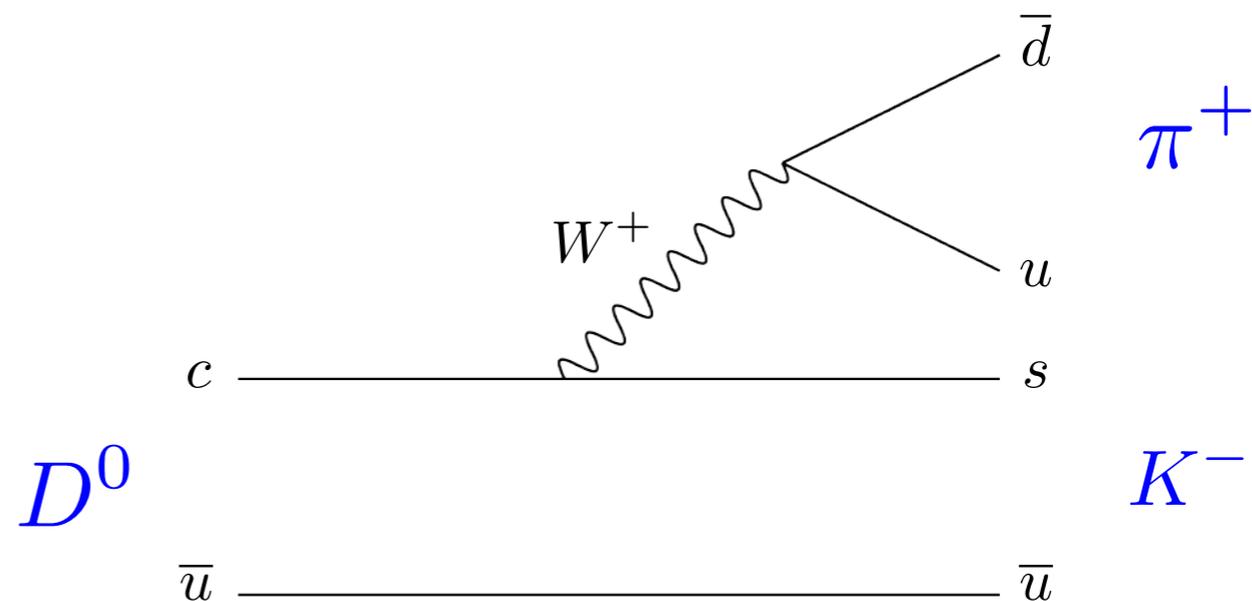
Massa = $1865 \text{ MeV}/c^2$ ($3.3 \times 10^{-27} \text{ Kg}$, circa il doppio di un protone)

Vita media = 0.4 ps ($4 \times 10^{-13} \text{ s}$), piccola ma misurabile!

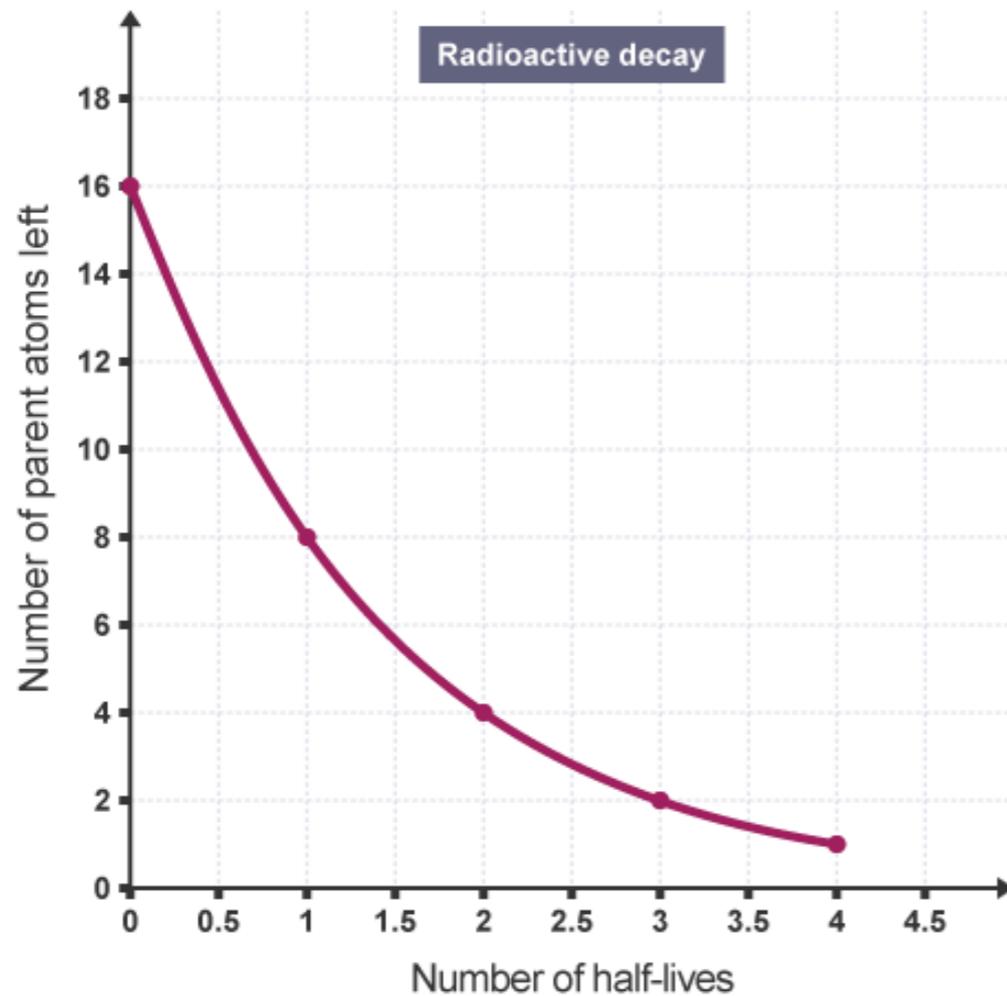
Velocità $\sim c$

Carica elettrica = 0

É una particella instabile ed esplode in due frammenti più leggeri: i mesoni K^- e π^+



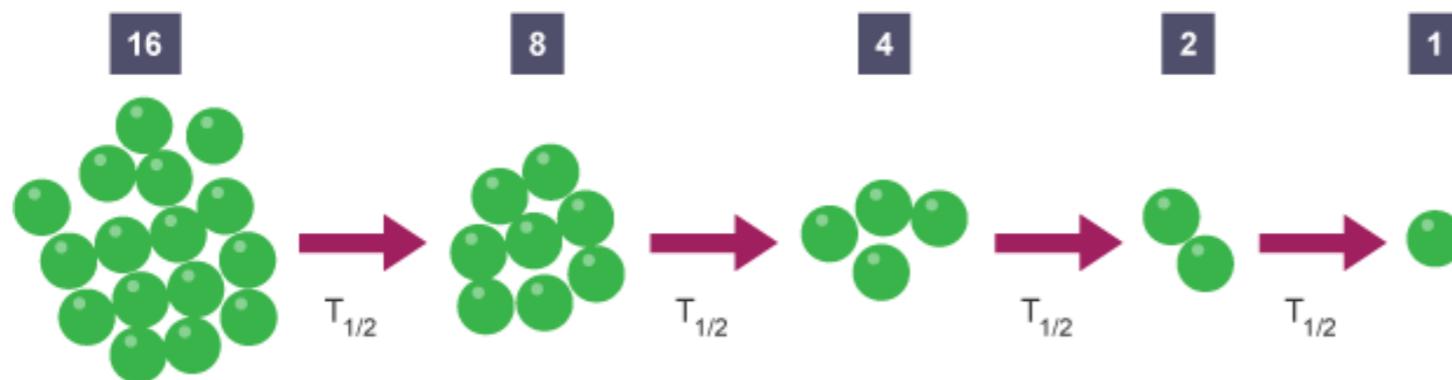
Decadimenti di particelle instabili



$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \Rightarrow \tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = \frac{T_{1/2}}{0.693}$$

A che servono gli studi di funzione?

1. Ad interpretare le leggi della natura
2. A passare l'esame di maturità (true story)



Traccia #2 della colonna sonora:

“CP violation” → [YouTube](#)

Come si misura la vita media?

1. Misuro direttamente il tempo: cronometro

Il D^0 è troppo piccolo, veloce e non ha carica elettrica!



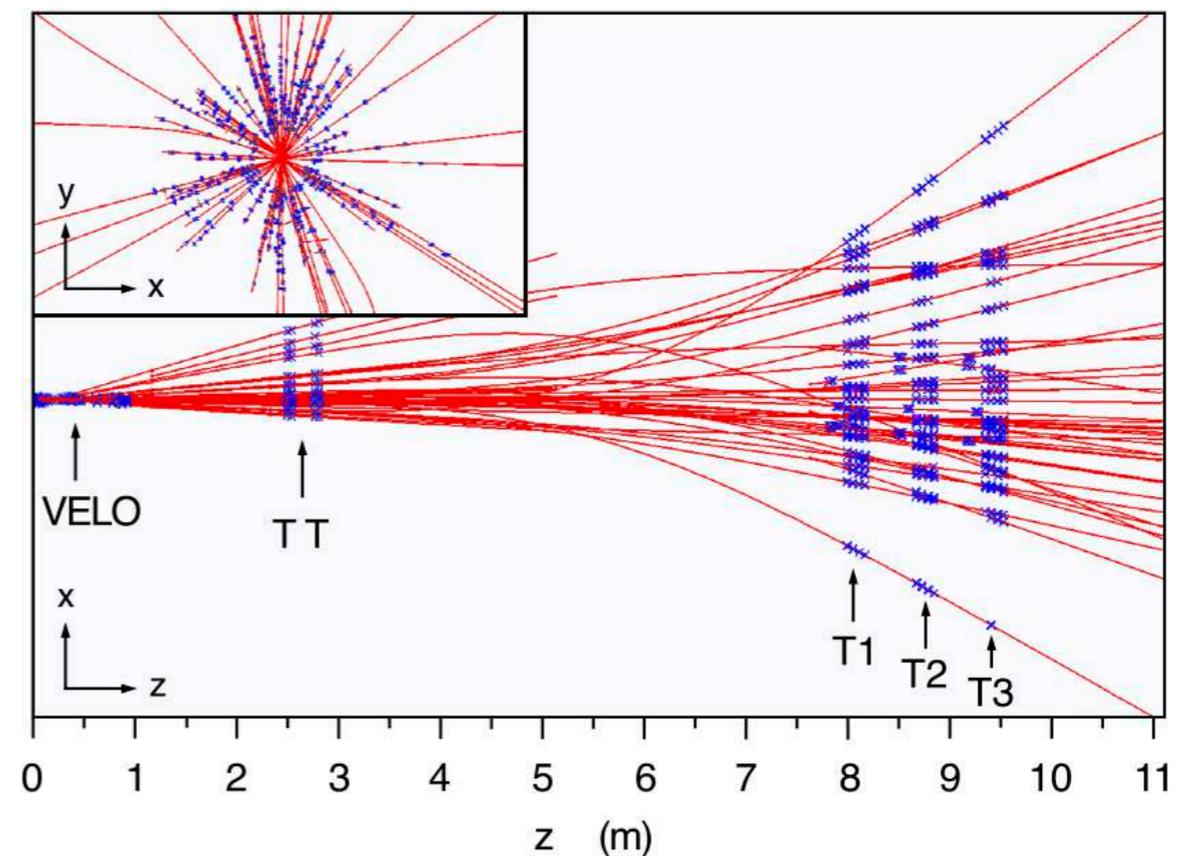
2. Ricavo il tempo misurando distanza e velocità:

se si muove alla velocità della luce:

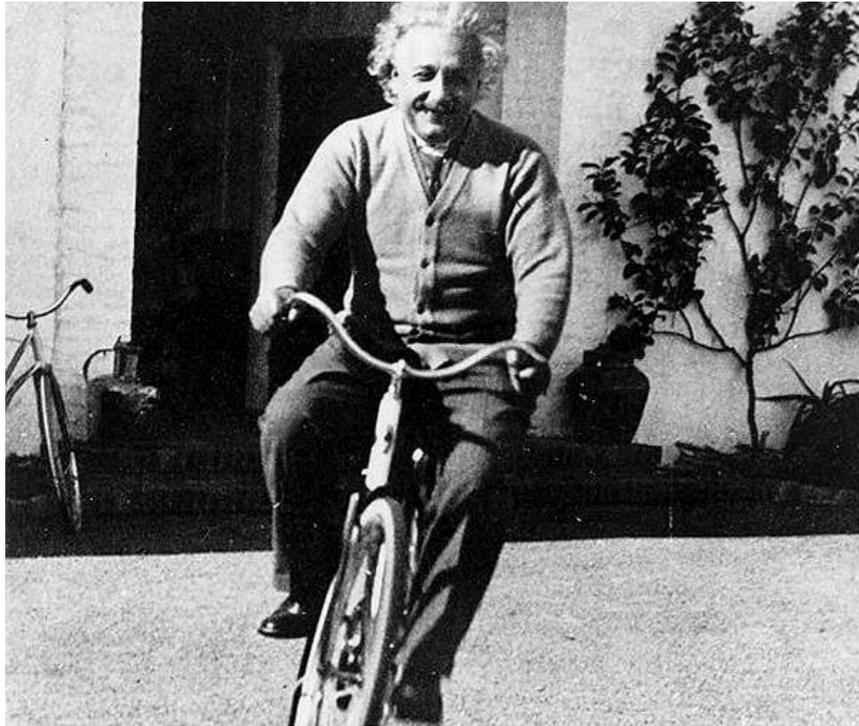
$$d = c \cdot \tau = 0.12 \text{ mm}$$



velocità = spazio / tempo
Galileo: EASY

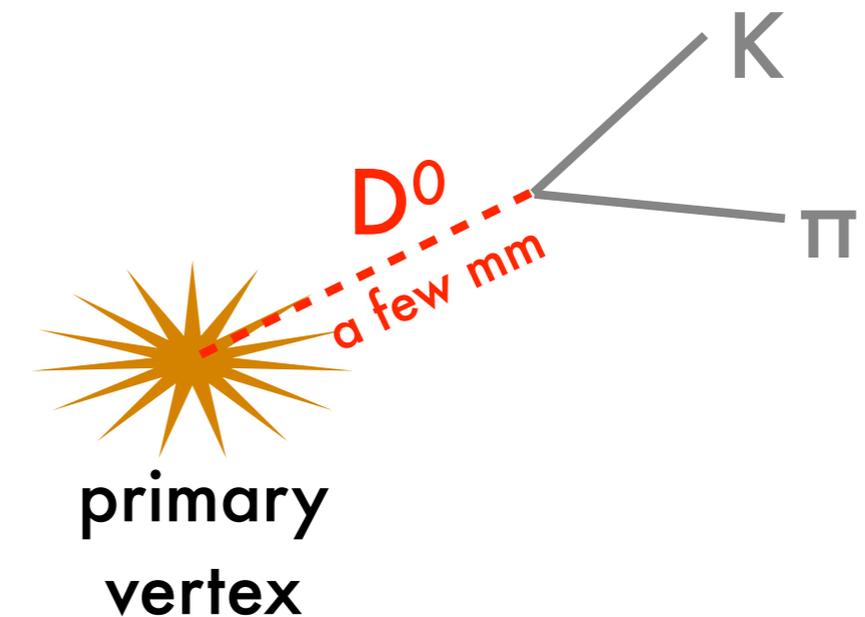
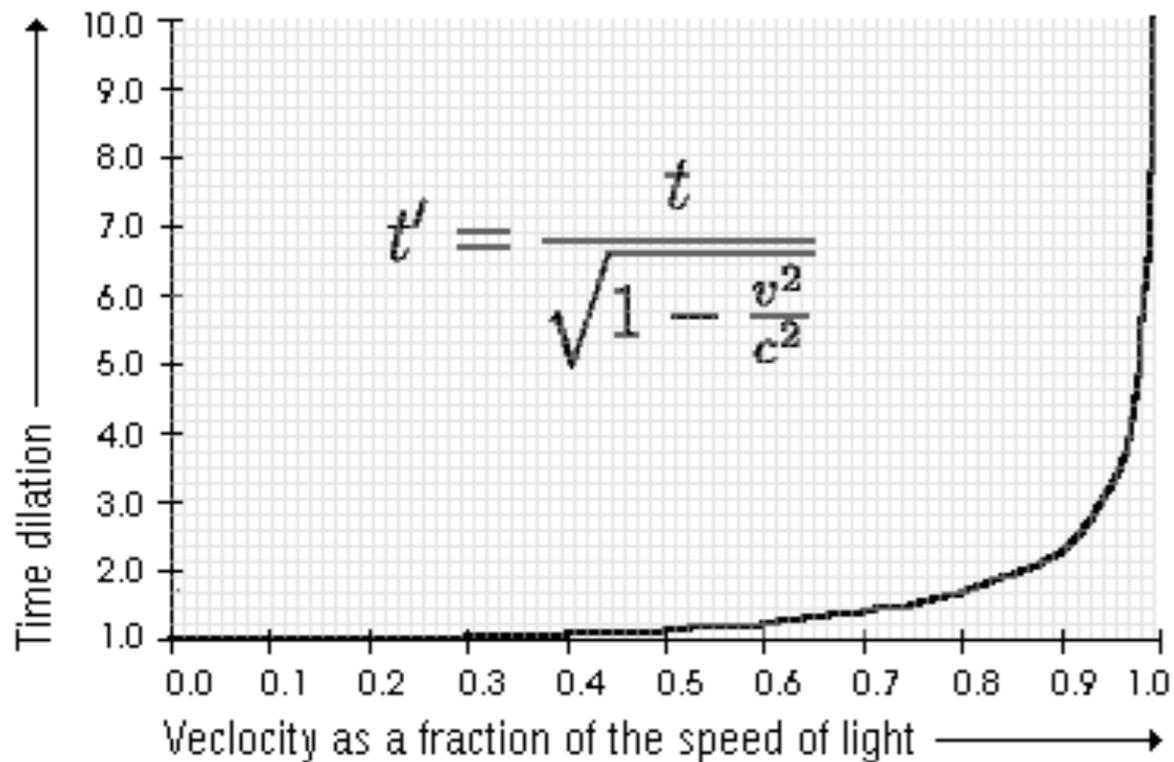


Per fortuna c'è la relatività!



Einstein: WRONG!
Andando veloci il tempo si dilata!

Il D^0 cammina per **qualche millimetro** prima di esplodere: una distanza ben misurabile!

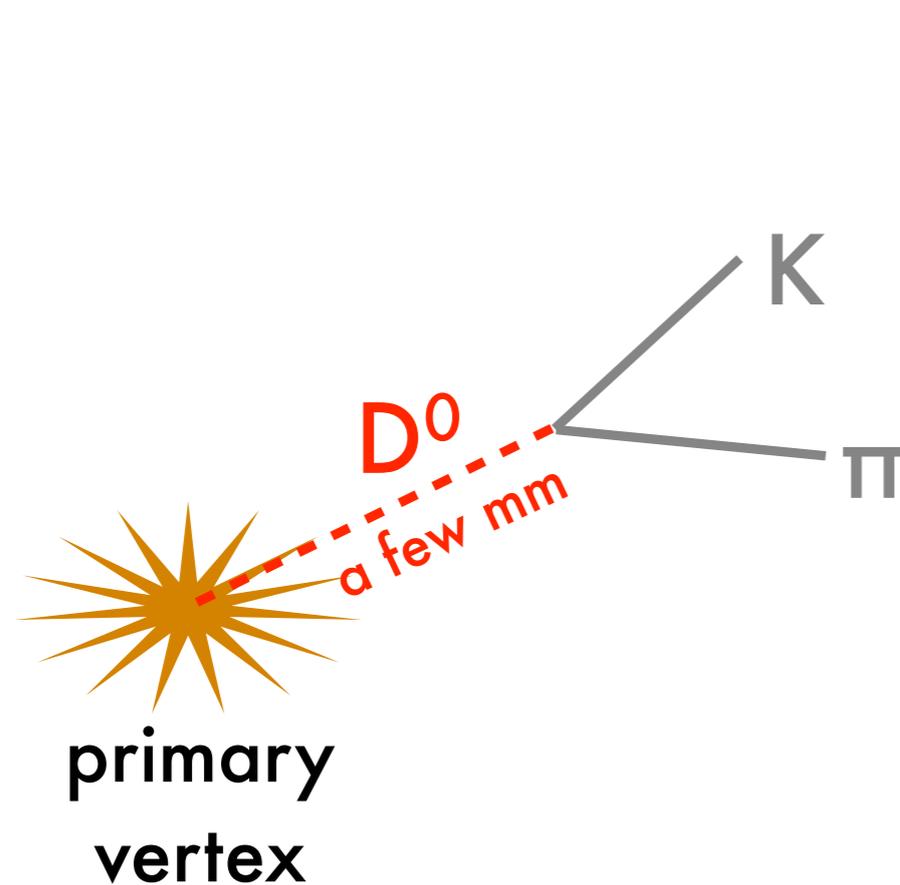


$$d = c\tau\beta\gamma$$

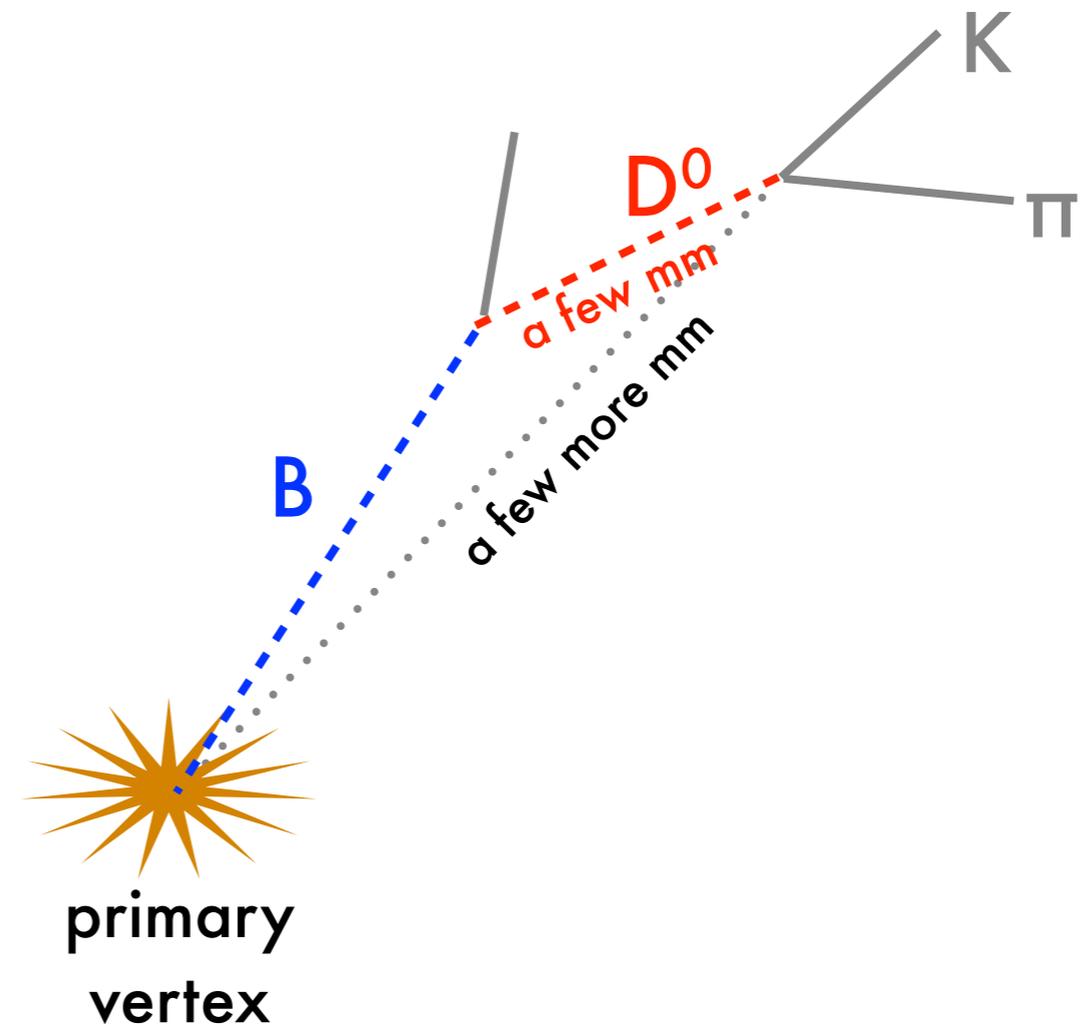
dilatazione del tempo

Un paio di problemini

1. I D^0 sono neutri quindi non lasciano tracce! Vediamo i K^- e π^+ di decadimento
2. Le collisioni ad alta energia non generano solo mesoni D^0 :



Produzione diretta
 $pp \rightarrow D^0$



Produzione secondaria
 $pp \rightarrow B \rightarrow D^0$

A lavoro!

Collegatevi a:

<https://lhcb-d0.web.cern.ch/>

Inserite i vostri dati,
selezionate una
combinazione di eventi e
cliccate "Save"

Firstname
Albert

Surname
Einstein

Grade
A

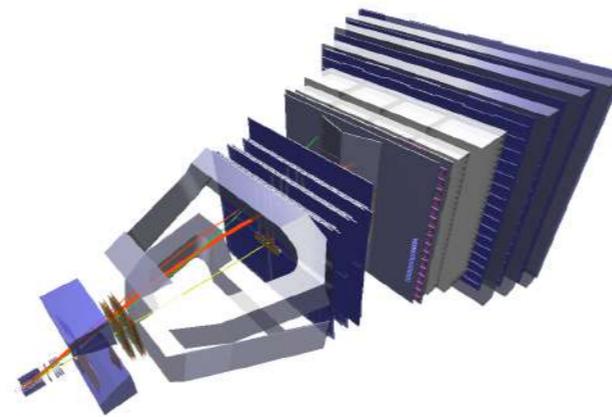
Combination
Combination 4

Save

L'esercizio è diviso in 2 parti:

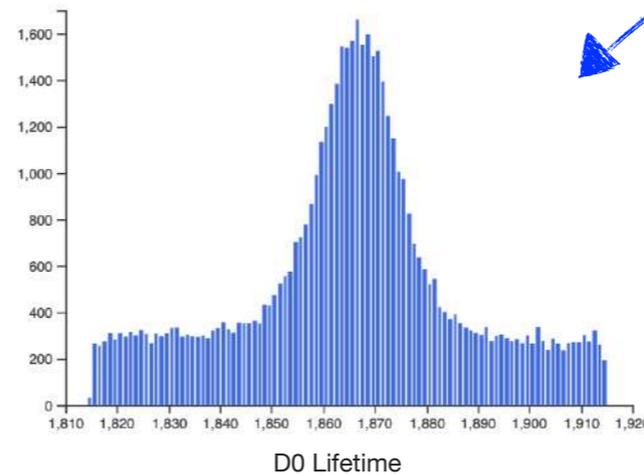
1. Event display

Ricerca delle tracce di
decadimento



Event Display

2. D^0 lifetime Analisi dati



ESERCIZIO 1: EVENT DISPLAY

ovvero: cercare
l'ago nel pagliaio



Event display

Event Display Exercise

The interface is divided into three main sections on the left and a large 3D visualization area on the right.

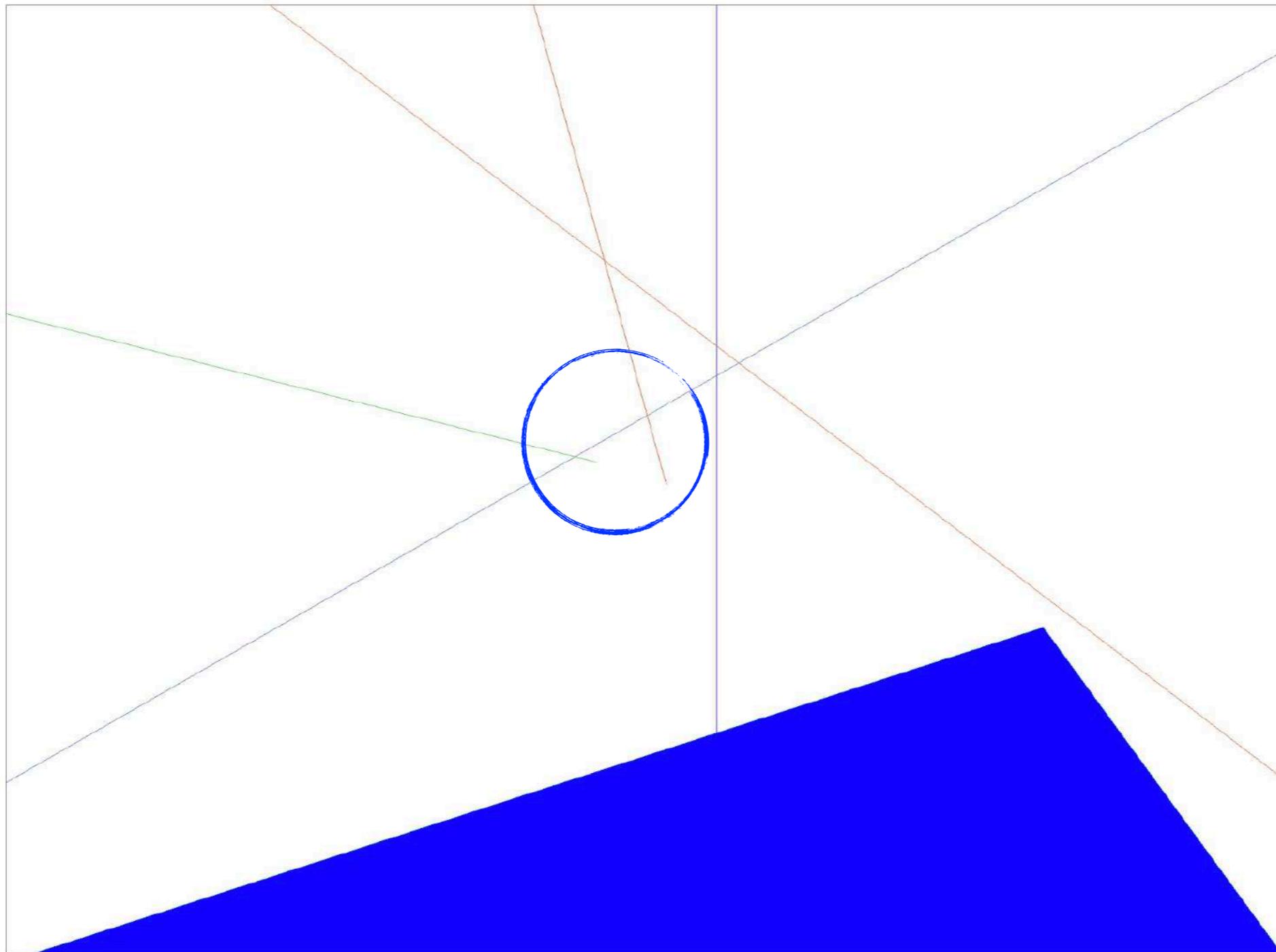
- Event handler:** Shows the current event file as `event_3_0.json`. It includes two buttons: `previous` and `next`.
- View:** Contains three toggle switches: `Zoom` (off), `Detector` (on), and `Help` (off). Below these is a `View` dropdown menu and an `Auto rotate` checkbox. At the bottom of this section is a horizontal slider.
- Legend:** Lists particle types with corresponding colored line segments: `K-` (red), `K+` (blue), `pi+` (green), `pi-` (purple), and `D0` (grey).
- Buttons:** At the bottom left of the interface are two buttons: `Read instructions` and `Download JSON`.

The 3D visualization area shows a complex detector structure with multiple layers. Particle tracks are overlaid on the detector, with colors corresponding to the legend. A blue arrow points from the text below to the legend.

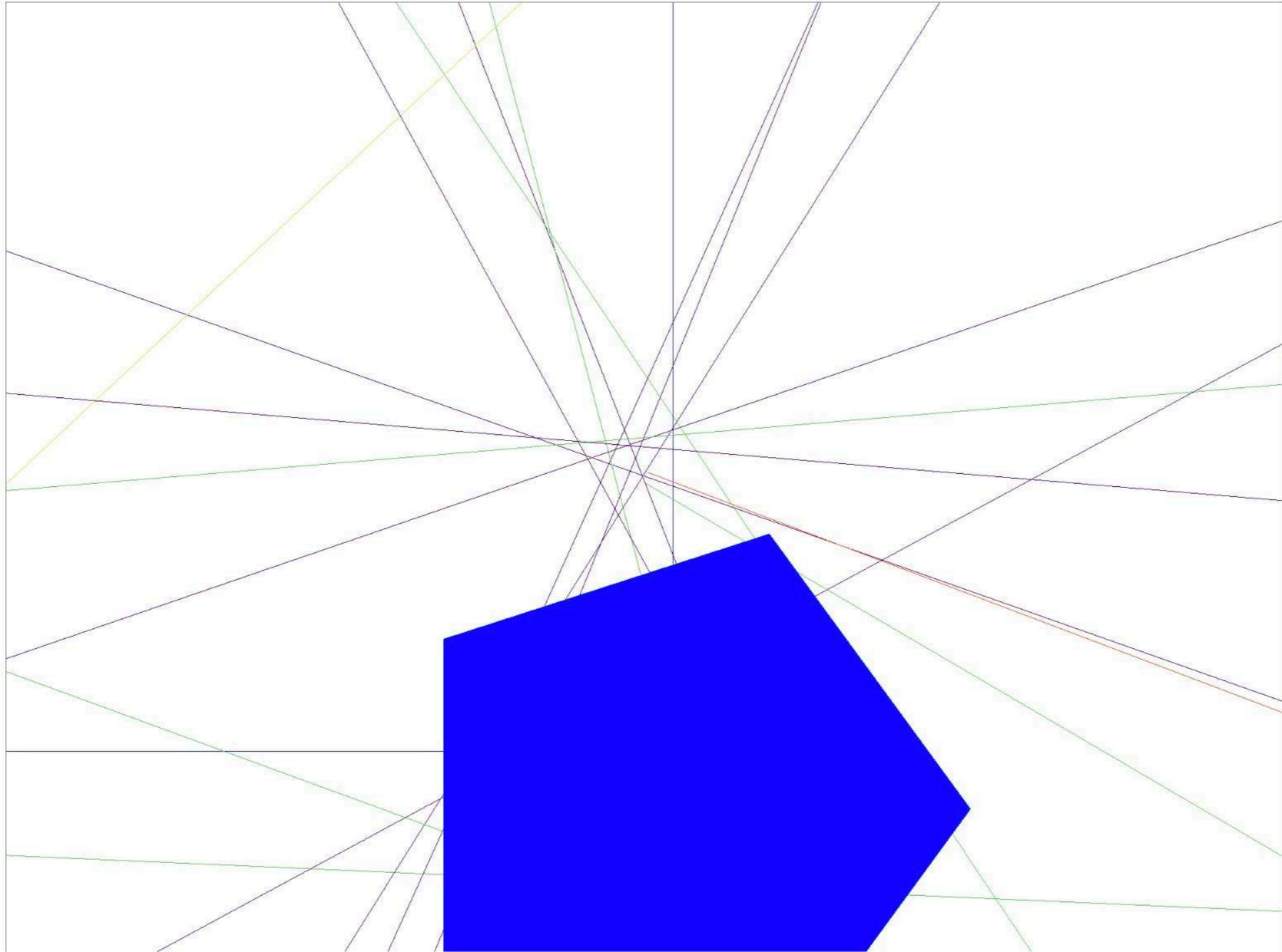
Il tipo di particella è comodamente indicato dal **colore della traccia**
Potete cambiare/ruotare la vista, zoomare, e rimuovere il rivelatore. Sperimentate!

Esempio: un evento facile

Alla ricerca di un K^- (rosso) e π^+ (verde) che si incontrano in un “punto” (vertice)
Il vertice deve essere **separato** dal vertice primario (dove originano la maggior parte delle tracce)



...e uno più difficile!



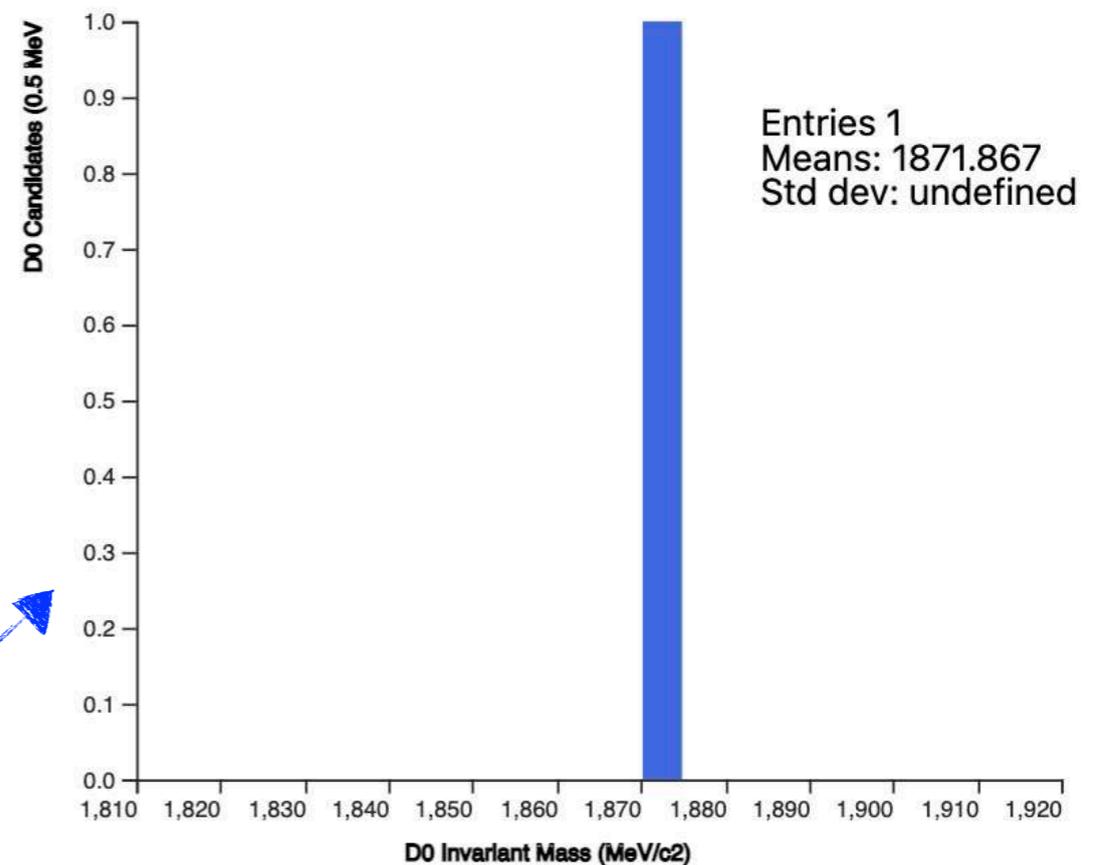
Salvare un evento

Non tutti gli eventi sono buoni!

Particle information			My particles	
E	7433.891	MeV	K-	
chi2	0.885		pi+	
ipchi2	0.260			
mass	139.570	MeV/c ²	Mass	
name	pi+		1871.867	MeV/c ²
ZFstM	124.088			
			Add	

Se trovate un evento buono:

1. Selezionate le tracce
2. Guardate il valore della massa invariante* : se è vicino alla massa del D^0 aggiungete l'evento ("Add")
3. repeat! (Event handler → "next").
In questo modo populate **l'istogramma di massa**

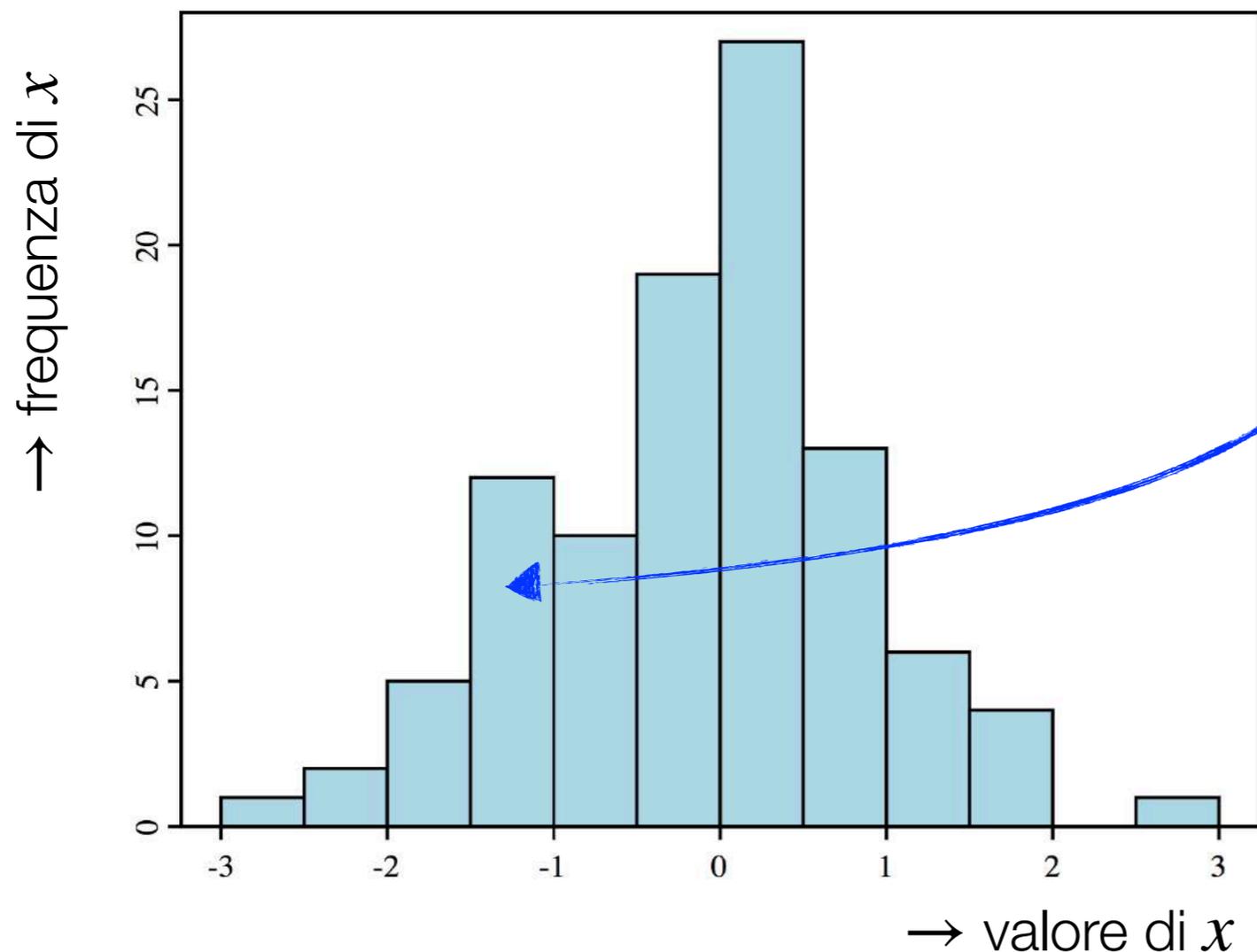


$$* m_{D^0}^2 = m_K^2 + m_\pi^2 + 2\sqrt{m_K^2 + p_K^2}\sqrt{m_\pi^2 + p_\pi^2} - 2p_K p_\pi \cos\vartheta$$

Cos'è un istogramma?

Un modo di rappresentare graficamente una serie di misure

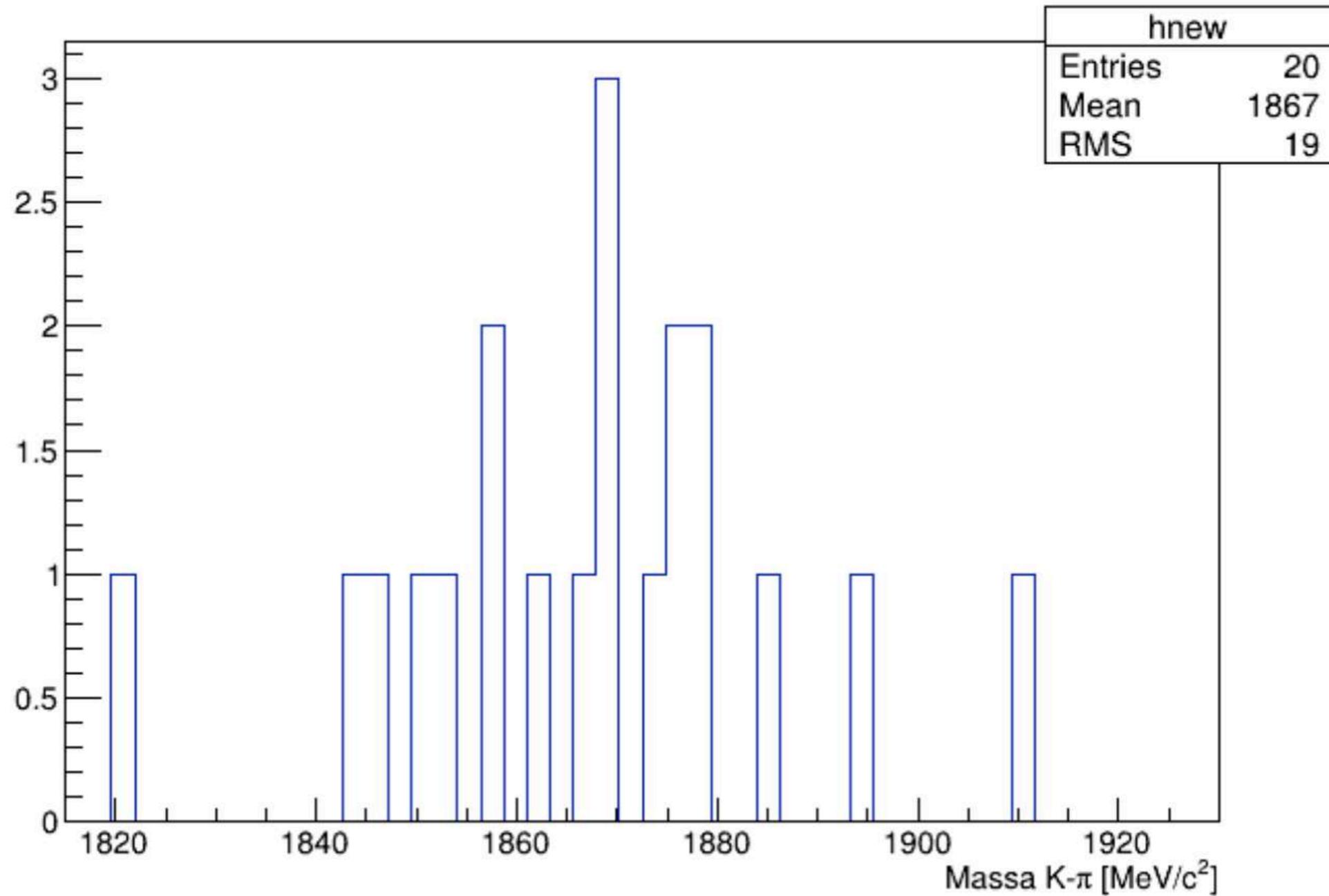
- Ogni misura è classificata in un intervallo (“bin”) a seconda del suo valore
- L'altezza delle barre è il numero di volte in cui il valore misurato cade all'interno del bin



Se misuro $x = -1.2$ devo riempire il bin numero 4:
 $x \in [-1.5, -1.0]$

Esercizio 1: risultato

Alla fine dell'esercizio 1 si ottiene l'istogramma di massa del D^0



ESERCIZIO 2: D^0 LIFETIME

ovvero: un tipico giorno
di lavoro al CERN!



Segnale vs fondo

Passiamo ora all'analisi dati, partiamo da un istogramma di massa... ma con **più dati!**
Notiamo due popolazioni sovrapposte:

Analysis tools

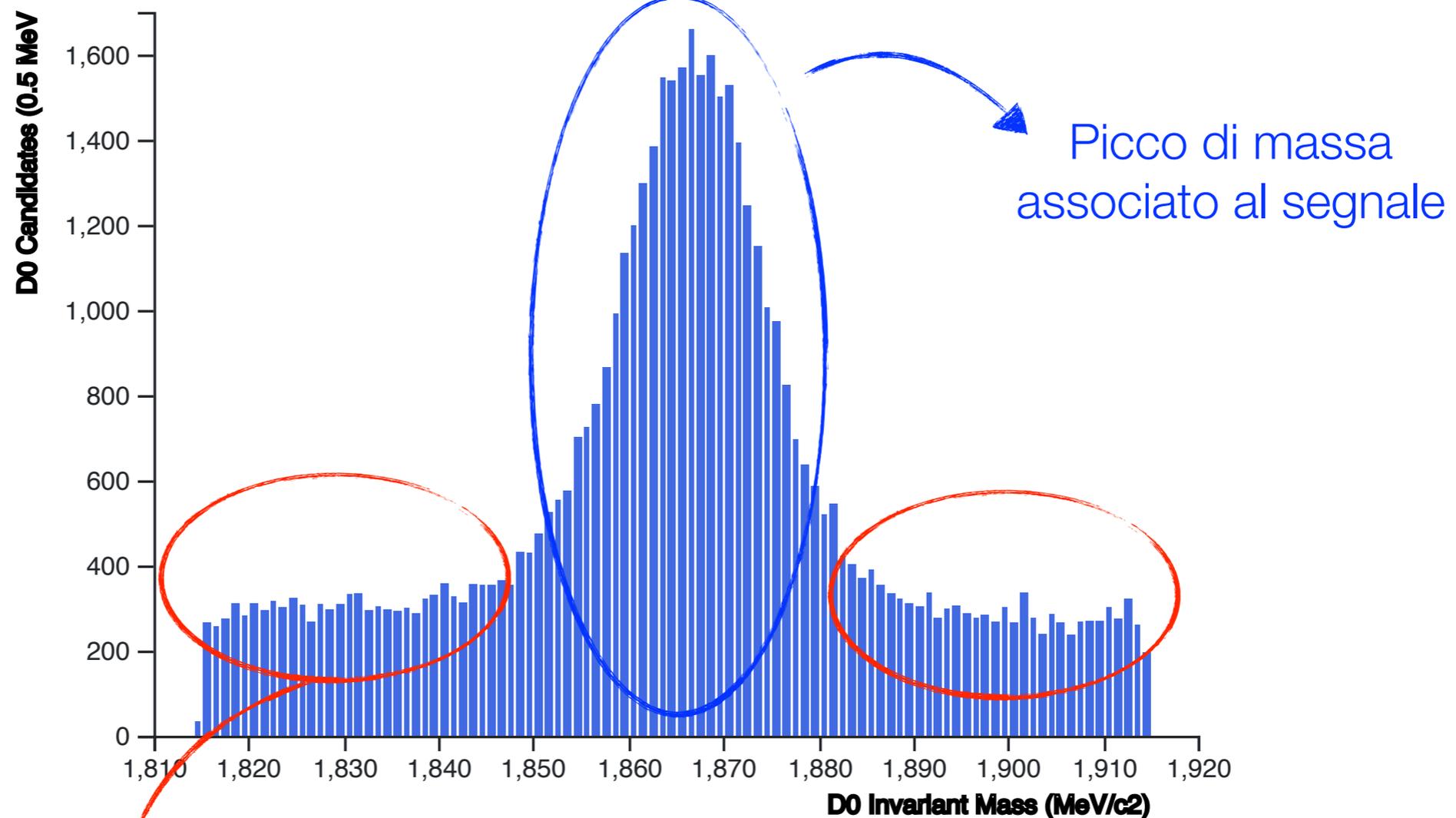
- Plot D^0 mass
- Fit mass distribution

Background substr.

Signal range

1810 1915

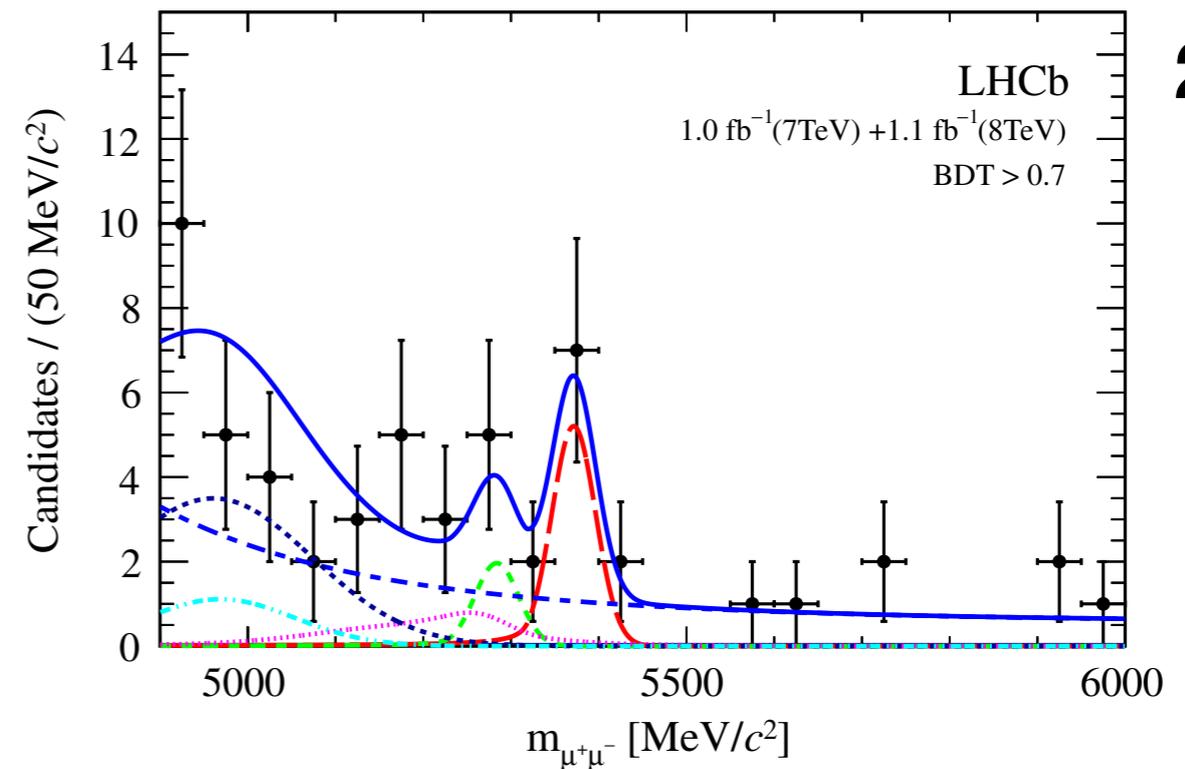
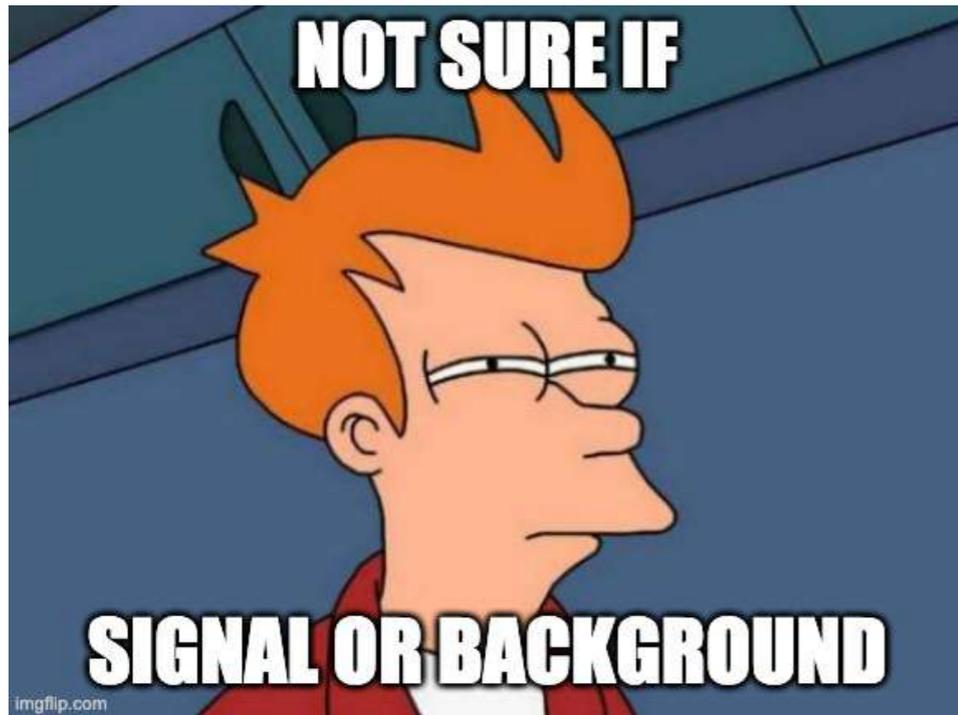
Plot distributions



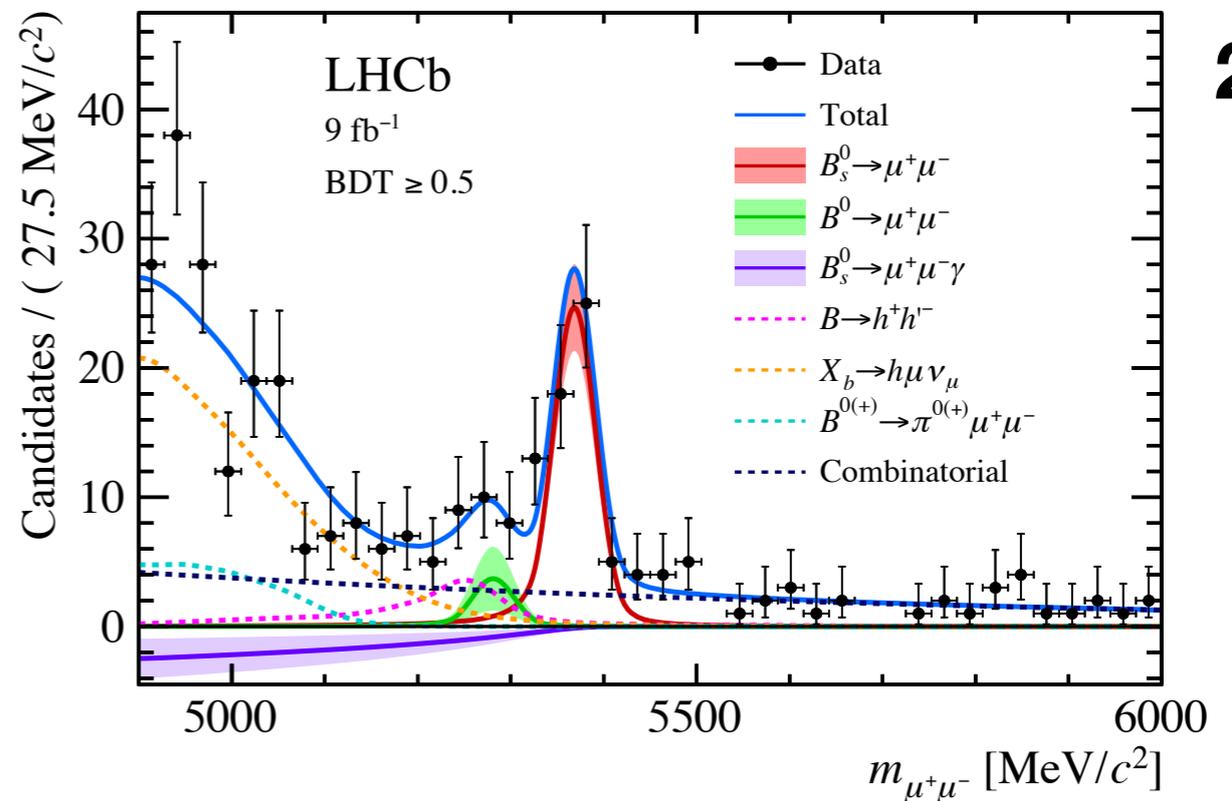
Fondo combinatorio: un K^- e un π^+ che NON vengono dal decadimento di un D^0

Ricerca del decadimento raro $B \rightarrow \mu^+ \mu^-$

Tutti i campioni hanno segnale e fondo: più grande è il loro rapporto, più chiara l'osservazione!



2012



2021

Bisogna accumulare dati per decretare una scoperta!

Fit alla massa

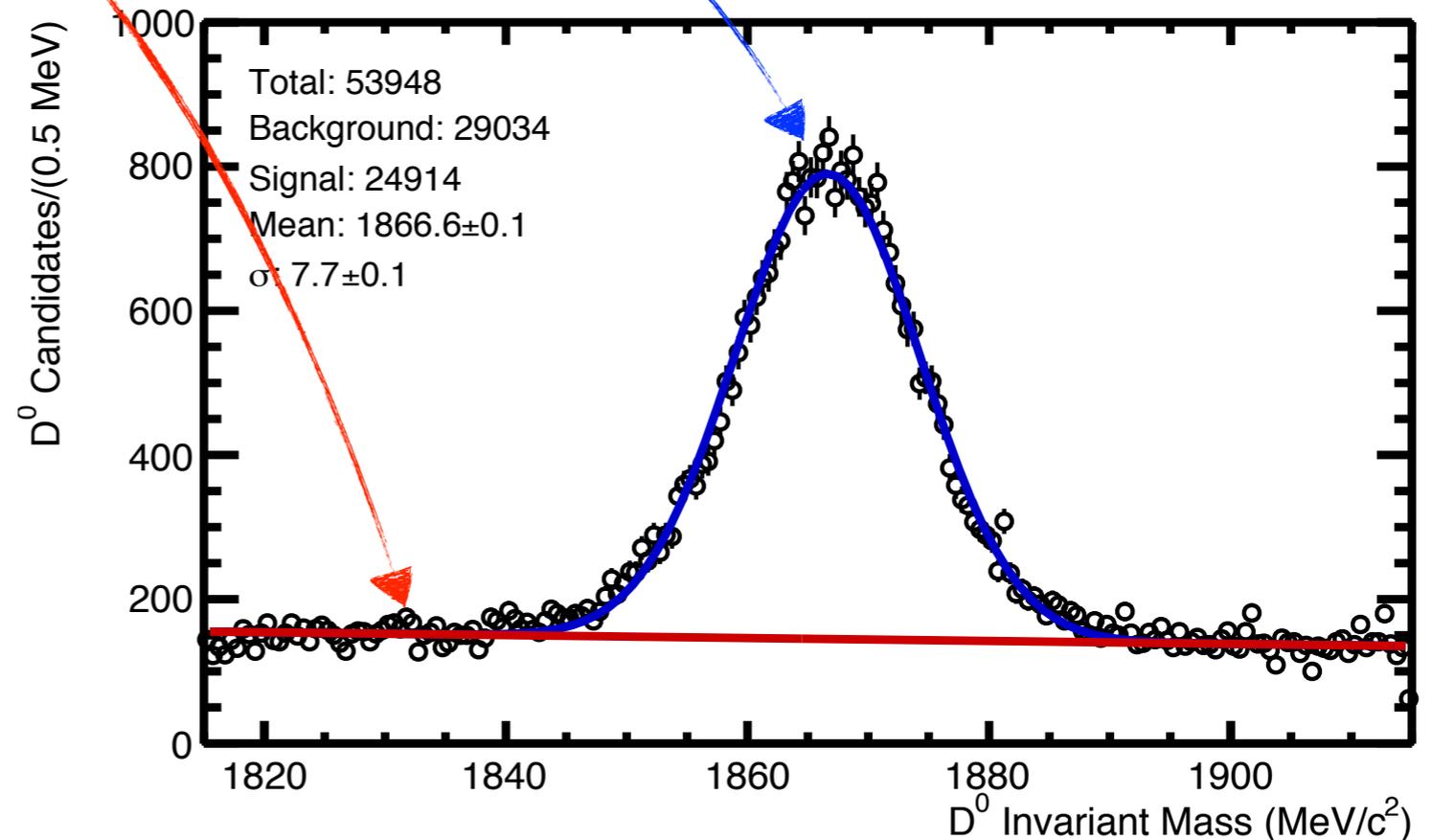
Per isolare il segnale a cui siamo interessati (il picco di massa del D^0) eseguiamo un **FIT**

Fit: adattare un modello parametrico (funzione) ai dati

1. Segnale \rightarrow Gaussiana

2. Fondo combinatorio \rightarrow Retta

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$



Fit alla massa

Il fit trova i parametri che meglio si adattano ai dati. Il parametro μ (mean) della Gaussiana è la misura della massa del D^0 , il parametro σ (standard deviation) indica l'errore.

Analysis tools

Plot D^0 mass

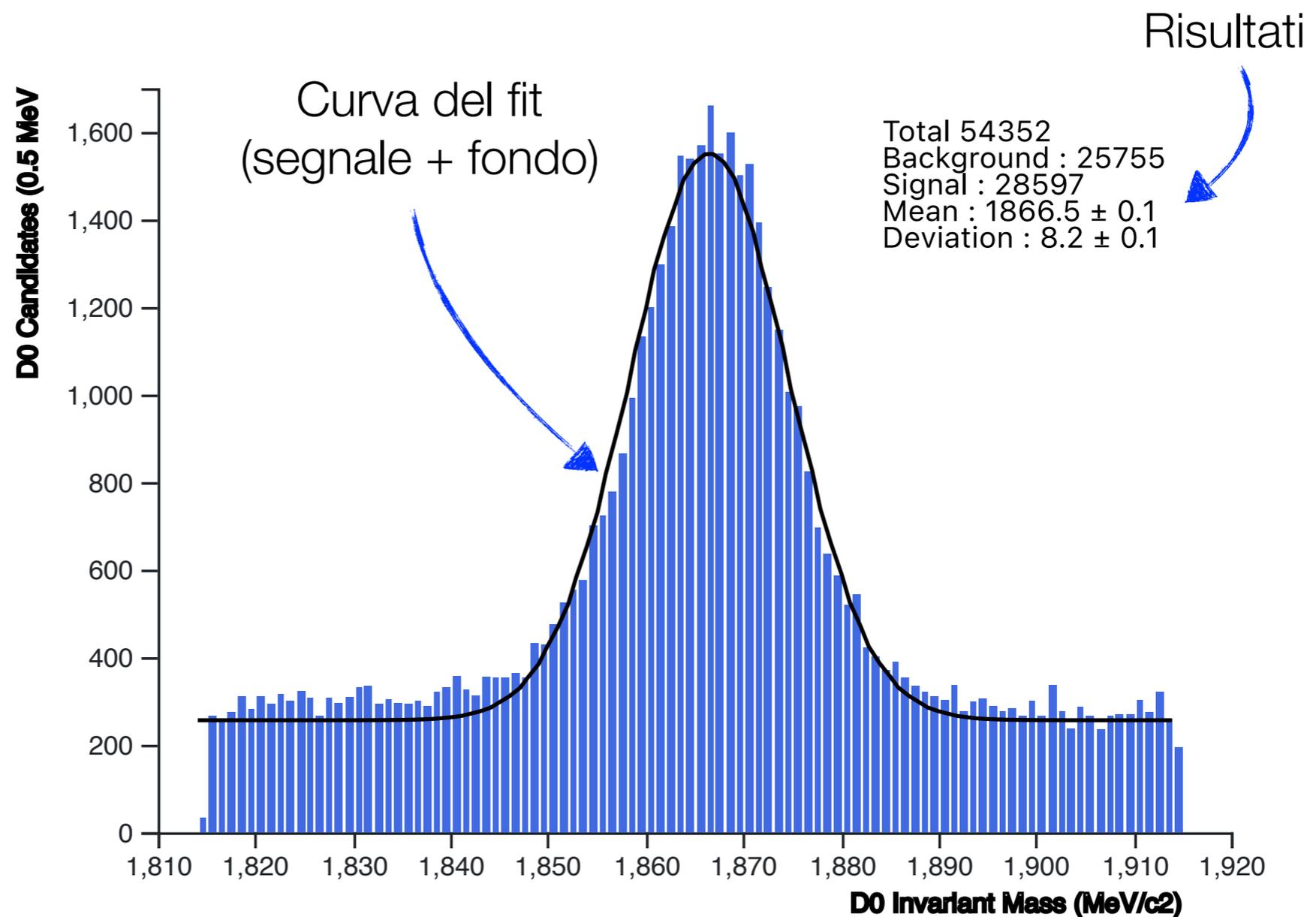
Fit mass distribution

Background substr.

Signal range

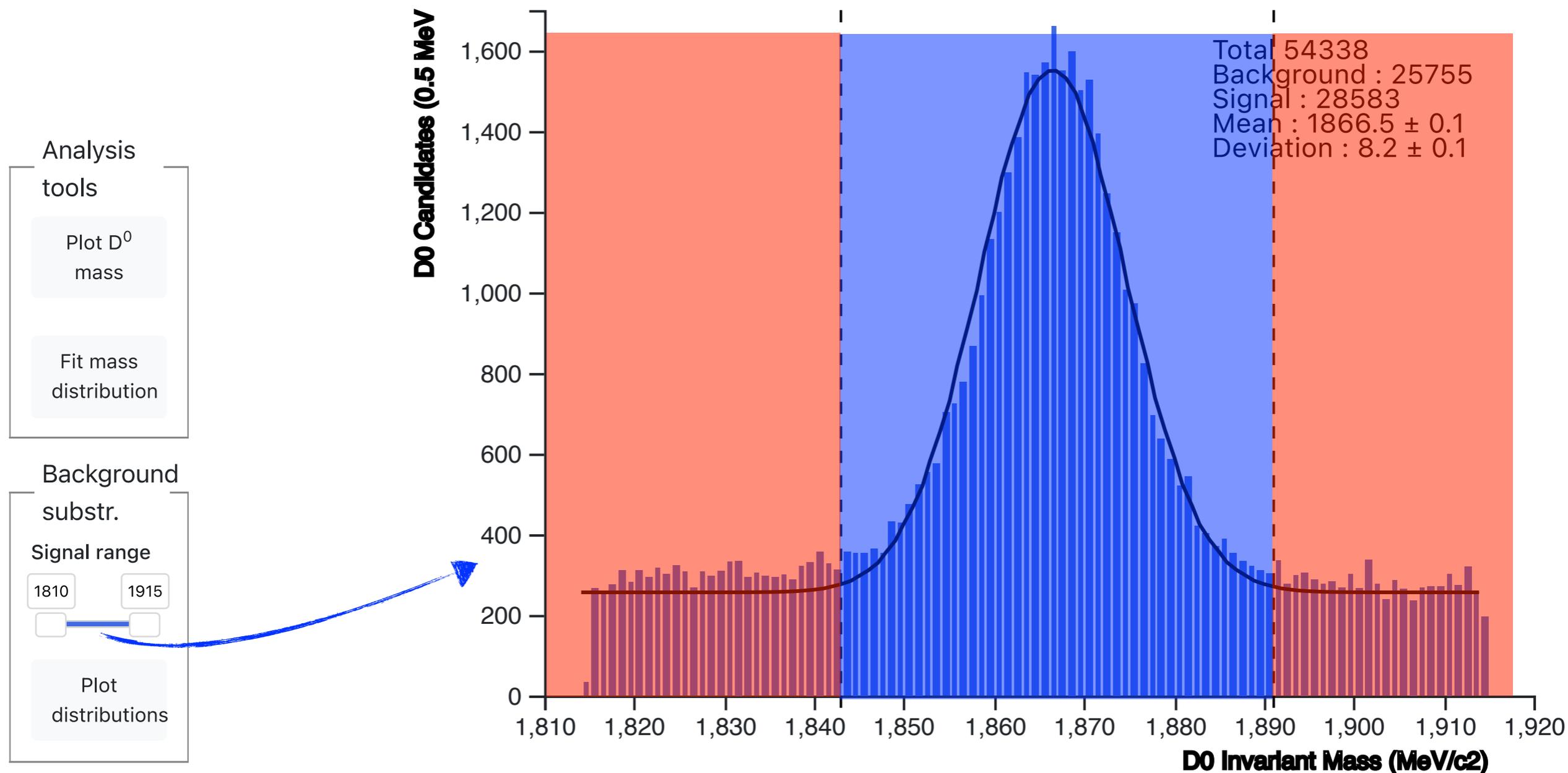
1810 1915

Plot distributions



Rimuovere il fondo

Selezioniamo la regione di segnale, prendendo una regione larga 3σ attorno al valore centrale μ . Gauss docet: entro 3σ è contenuto il **99.7 %** del segnale



blu: tieni gli eventi, rosso: scarta gli eventi

Rimuovere il fondo: sfruttiamo più variabili!

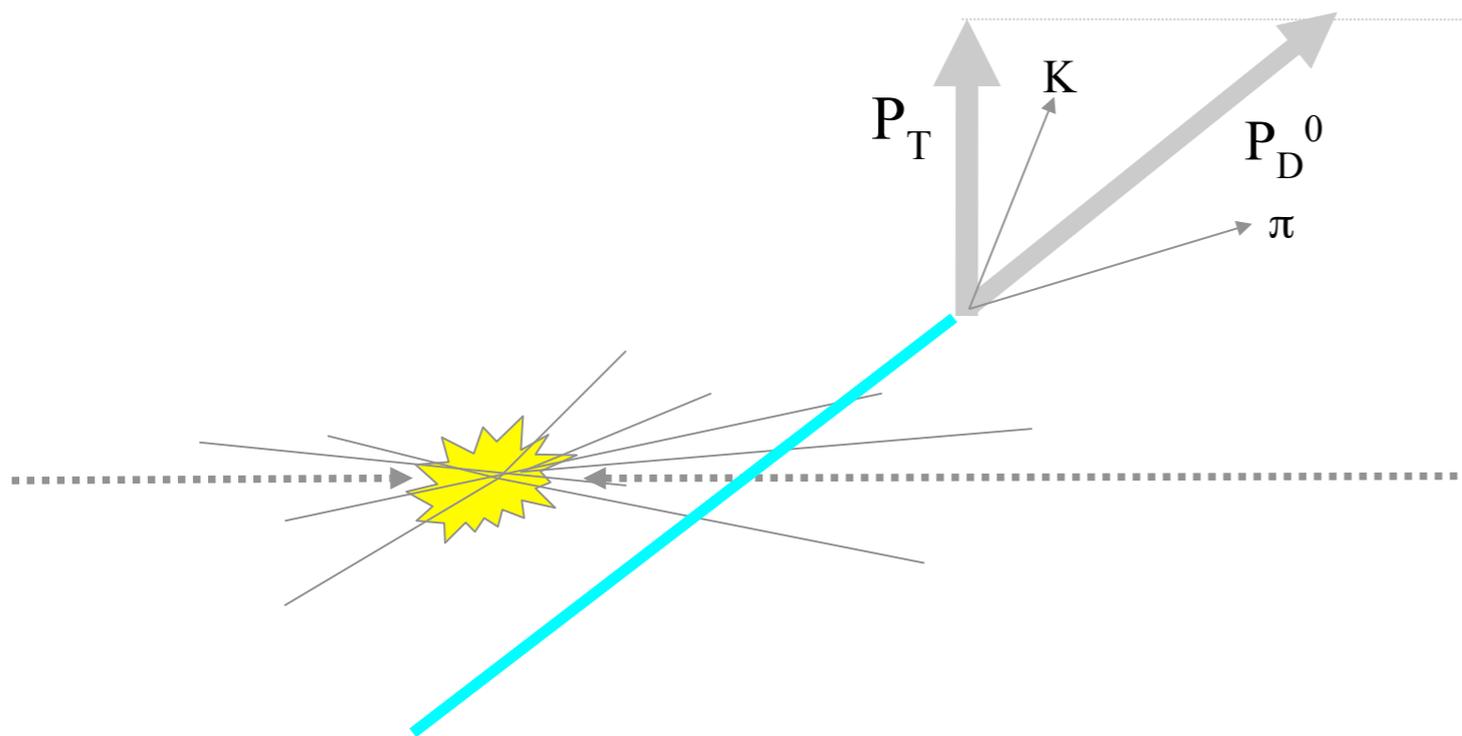
Abbiamo “tagliato” sul valore della massa, ma possiamo **sfruttare altre variabili** per separare segnale e fondo e quindi **migliorare la misura**.

Dopo aver definito la regione di massa possiamo analizzare: PT, TAU, IP

The image shows a software interface for data analysis. On the left, there are two main sections: 'Analysis tools' and 'Background substr.'. 'Analysis tools' contains 'Plot D⁰ mass' and 'Fit mass distribution'. 'Background substr.' contains a 'Signal range' slider with values 1810 and 1915, and a 'Plot distributions' button which is circled in blue. On the right, there is a 'Variable range' section with three sliders: 'D⁰ PT' (range 2.5 to 20), 'D⁰ TAU' (range 0 to 10), and 'D⁰ IP' (range -4 to 1.5). Below these sliders is a 'Refresh' button.

vediamole
una per una

Impulso trasverso (P_T)

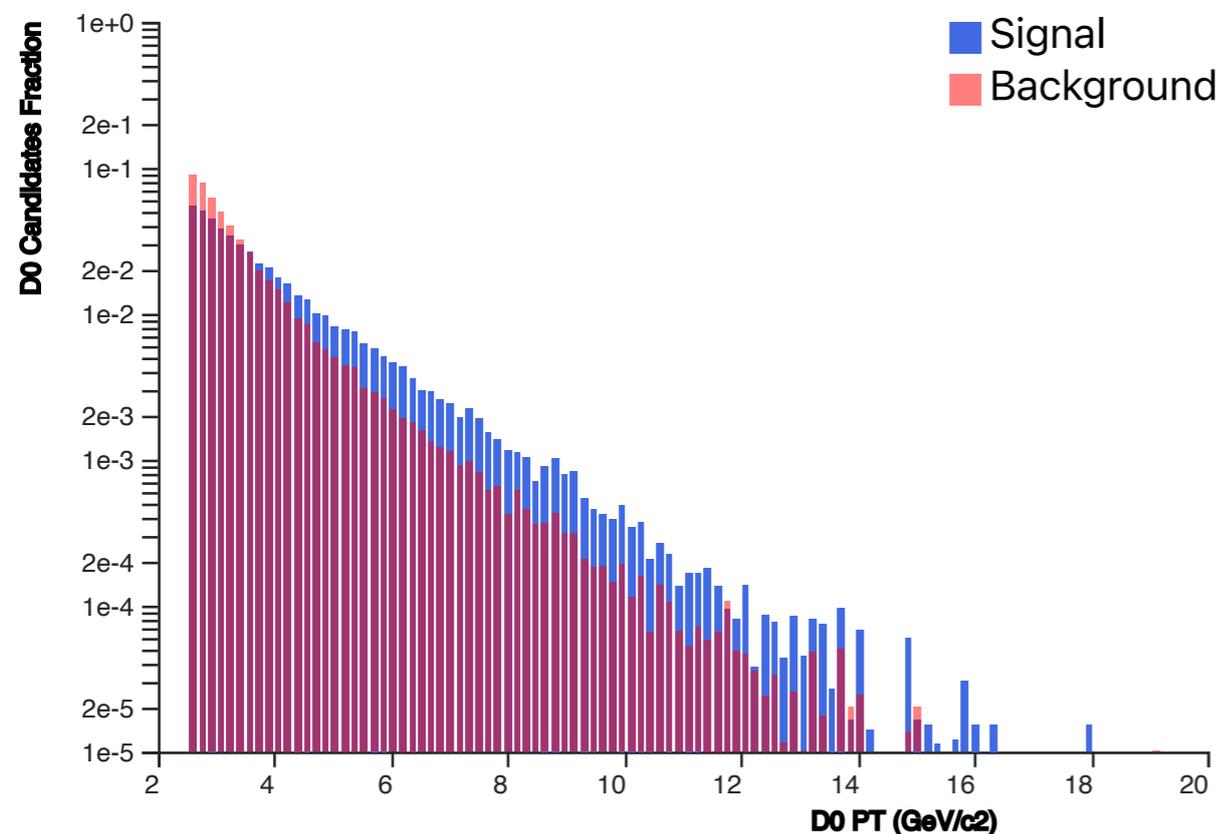
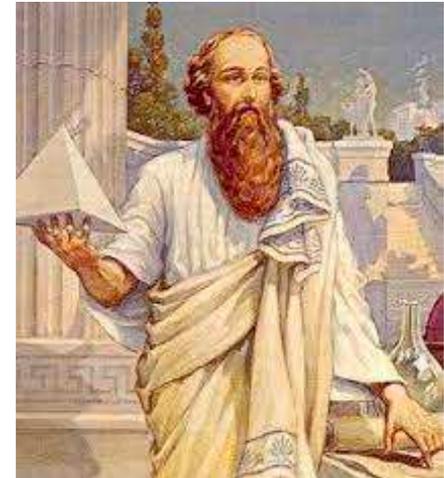


$$P_K + P_\pi = P_{D^0}$$

P_T è la componente dell'impulso trasversale ai fasci di protoni (z).

Pitagora!

$$P_T = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$$

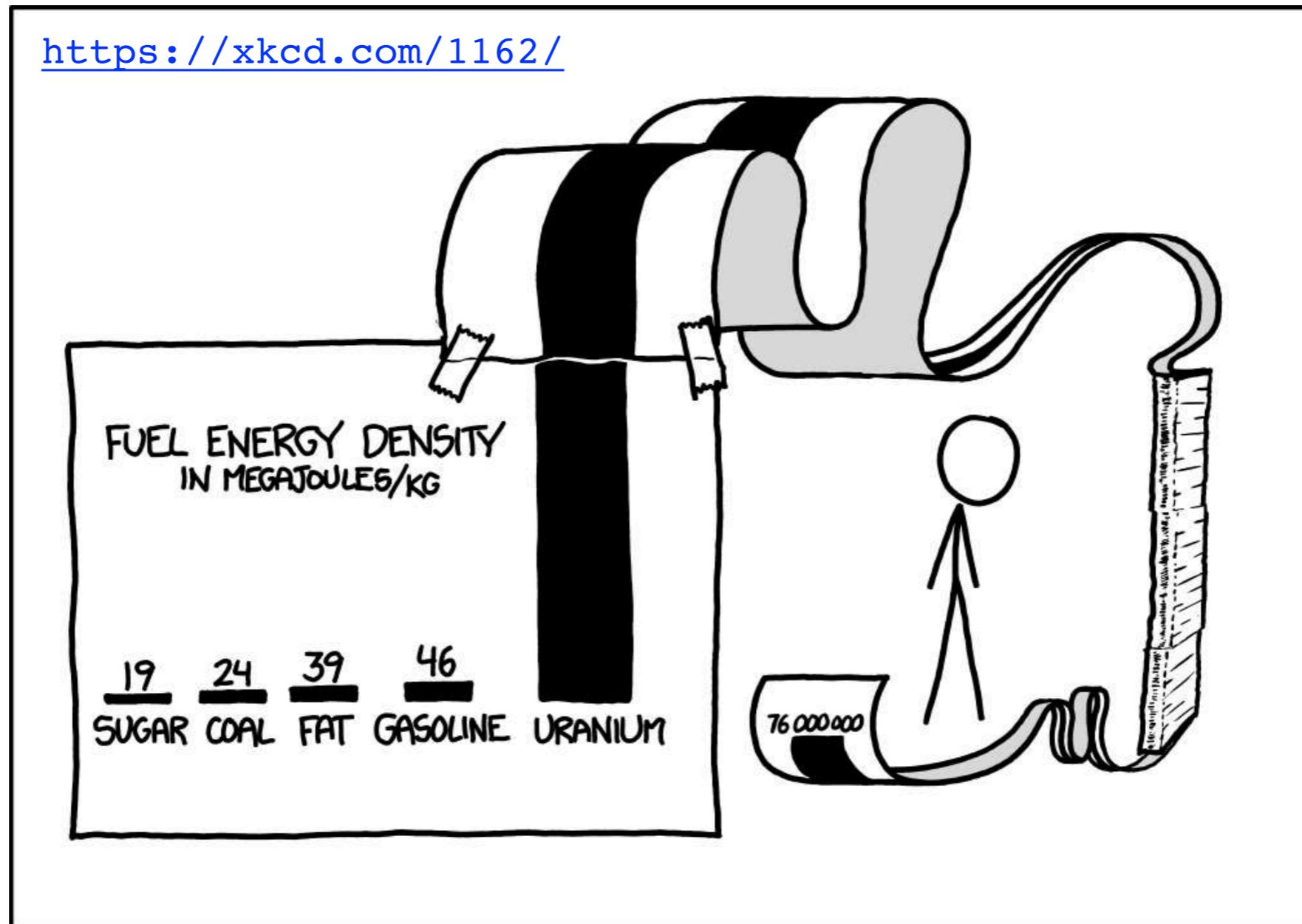


NB: scala logaritmica sull'asse y!

Il **segnale** tende ad avere P_T più alto

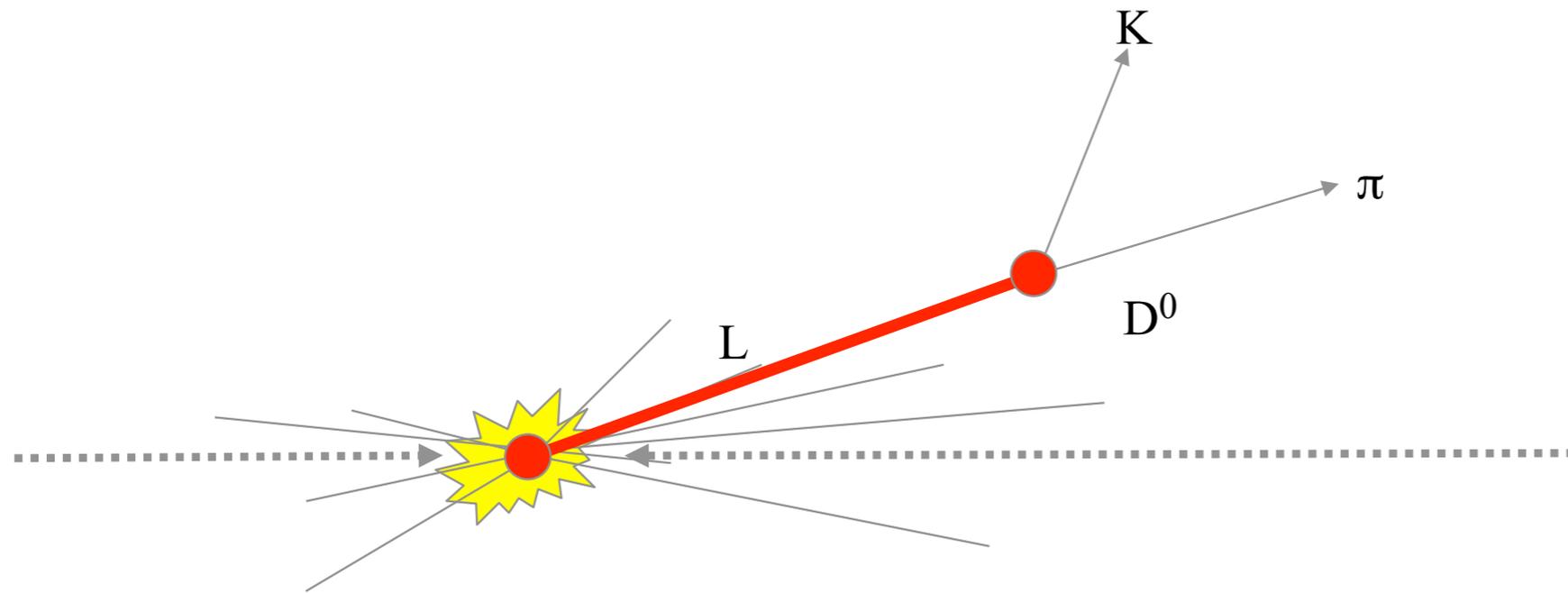
Scala logaritmica

La scala logaritmica serve per apprezzare meglio le differenze su vari ordini di grandezza!



SCIENCE TIP: LOG SCALES ARE FOR QUITTERS WHO CAN'T FIND ENOUGH PAPER TO MAKE THEIR POINT PROPERLY.

Tempo di decadimento (τ)

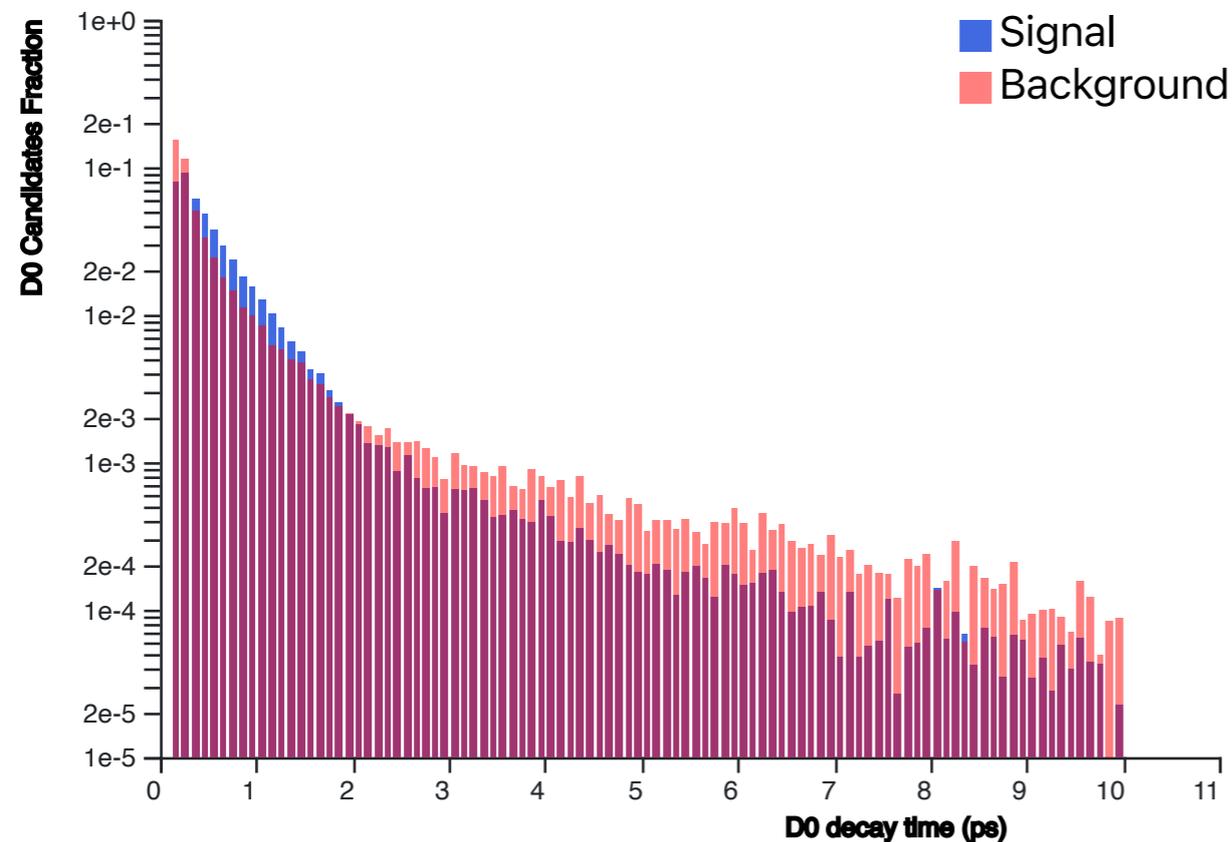


Il tempo di decadimento si calcola a partire dalla **lunghezza di volo L** :

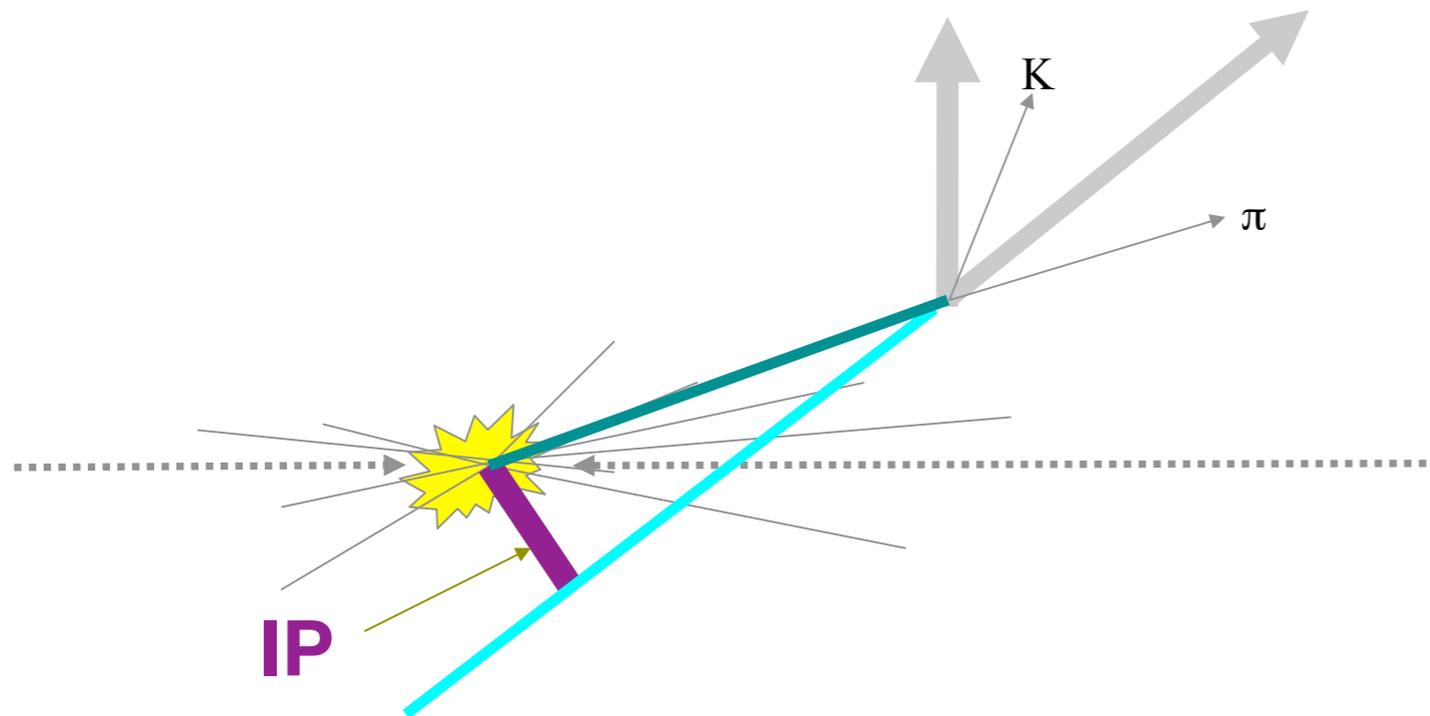
$$\tau = \frac{L}{\beta\gamma c} = \frac{Lm}{pc}$$

Il **segnale** tende ad avere τ più grande

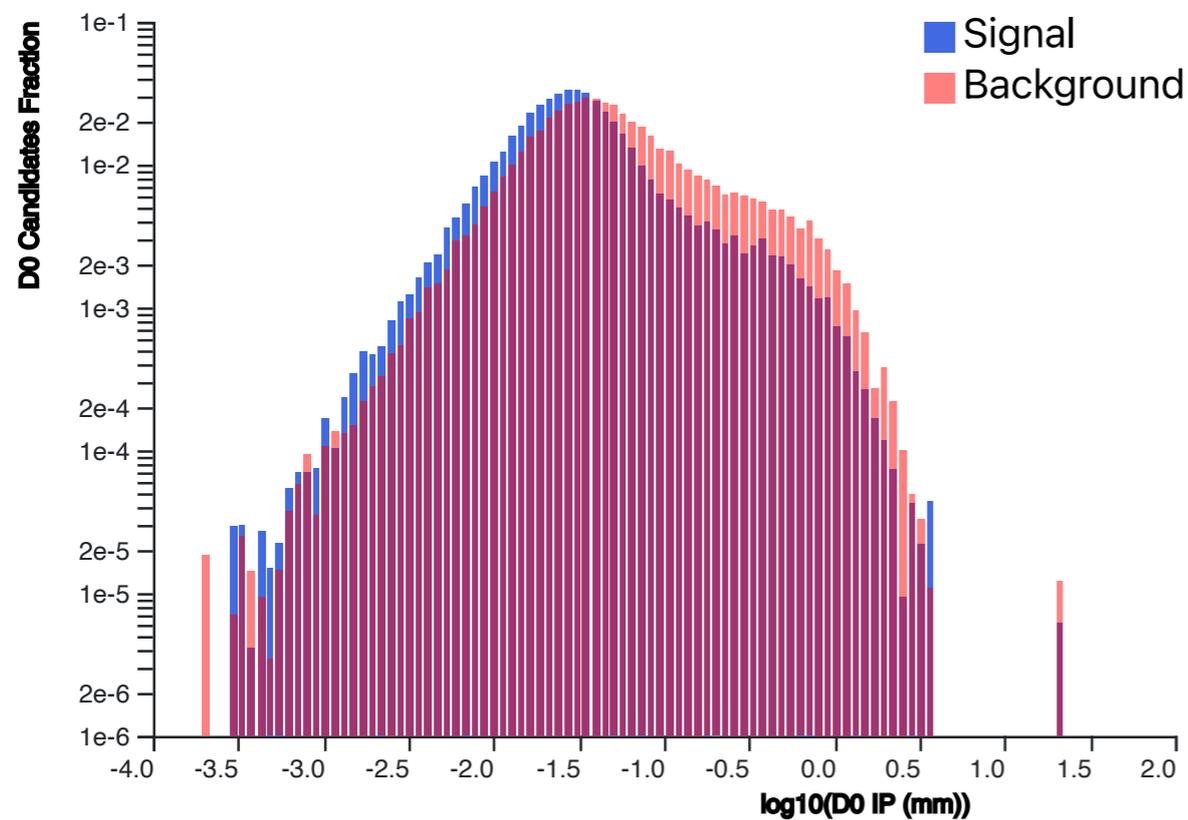
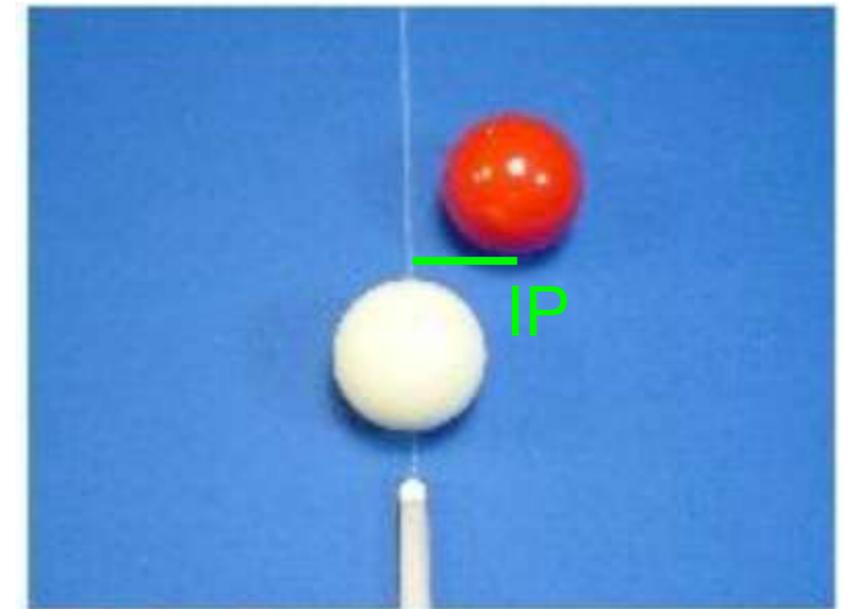
NB: la **vita media** è 0.4 ps, ma il **tempo di decadimento** del D^0 è casuale!



Parametro d'impatto (IP)



Minima distanza tra il vertice primario e la direzione del D^0



Il **segnale** tende ad avere IP più piccolo

NB: usiamo il $\log_{10}(\text{IP})$ sull'asse x!

Scelta dei tagli

Variable

range

D⁰ PT

2.5 20

D⁰ TAU

0 10

D⁰ IP

-4 1.5

Refresh

Dalla barra sinistra è possibile selezionare il range delle variabili in modo da rimuovere quanto più fondo possibile

Attenzione: i tagli sulle variabili rimuoveranno anche una parte del segnale!
→ trovare il giusto **compromesso**

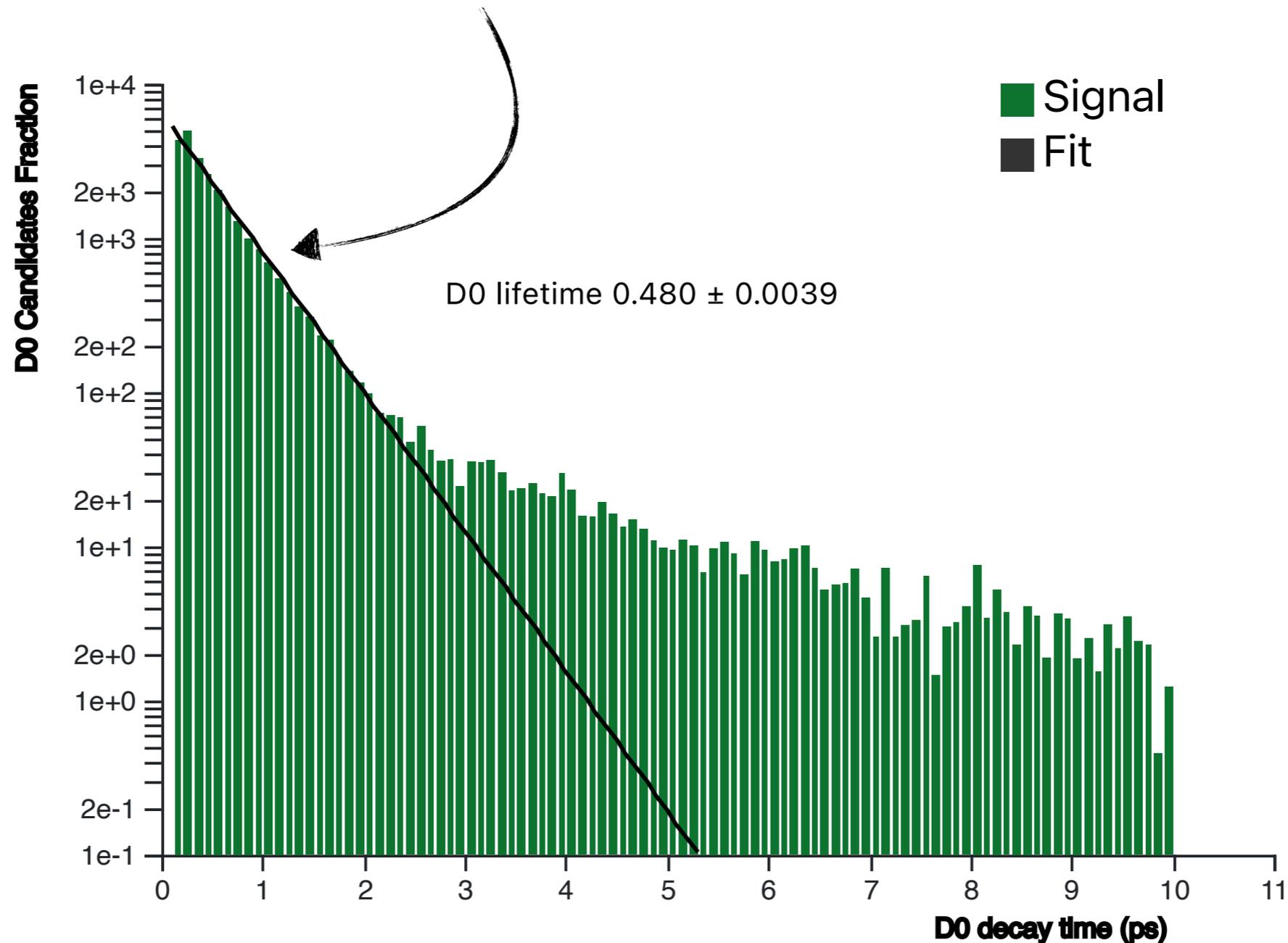
Otteniamo finalmente la distribuzione del tempo di decadimento del segnale, sulla quale possiamo eseguire un fit

Fit al tempo di decadimento



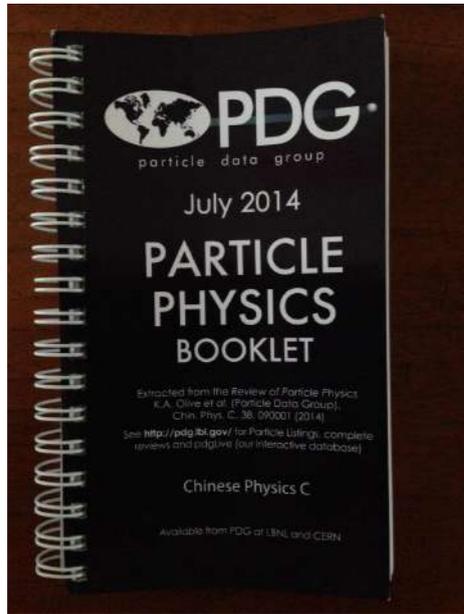
Il modello per il fit questa volta è la funzione esponenziale decrescente (linea nera):

$$N = N_0 e^{-t/\tau}$$



Dal fit otteniamo il parametro τ , ovvero la vita media del D^0

Il risultato del fit è in accordo con il PDG?



Prendiamo il testo sacro
Anche disponibile su: <https://pdg.lbl.gov/>

E cerchiamo il D^0 :
Interactive listings \rightarrow mesons \rightarrow charmed $\rightarrow D^0$

CHARMED MESONS INSPIRE search
($C = \pm 1$)
 $D^+ = c \bar{d}$, $D^0 = c \bar{u}$, $\bar{D}^0 = \bar{c} u$, $D^- = \bar{c} d$, similarly for D^* 's

D^0 $I(J^P) = 1/2(0^-)$

See related review:

[D⁰ - \$\bar{D}^0\$ Mixing](#) PDF

D⁰ MASS	1864.84 ± 0.05 MeV	∨
m_{D[±]} - m_{D⁰}	4.822 ± 0.015 MeV	∨
D⁰ MEAN LIFE	$(4.101 \pm 0.015) \times 10^{-13}$ s	∨

Vita media in funzione del parametro d'impatto

Variable range

D⁰ PT

D⁰ TAU

D⁰ IP

Refresh

1. Ridurre IP massimo

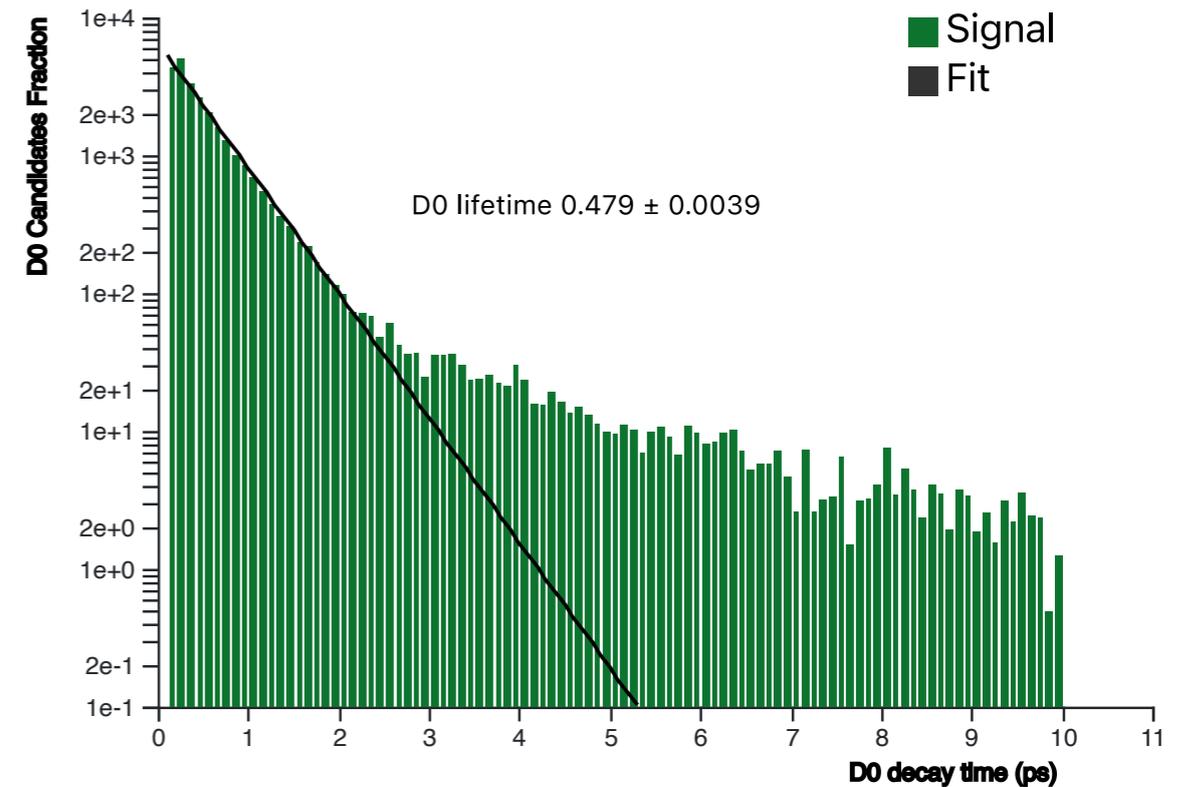
2. Ripetere il fit

3. Salvare il risultato

Time fit

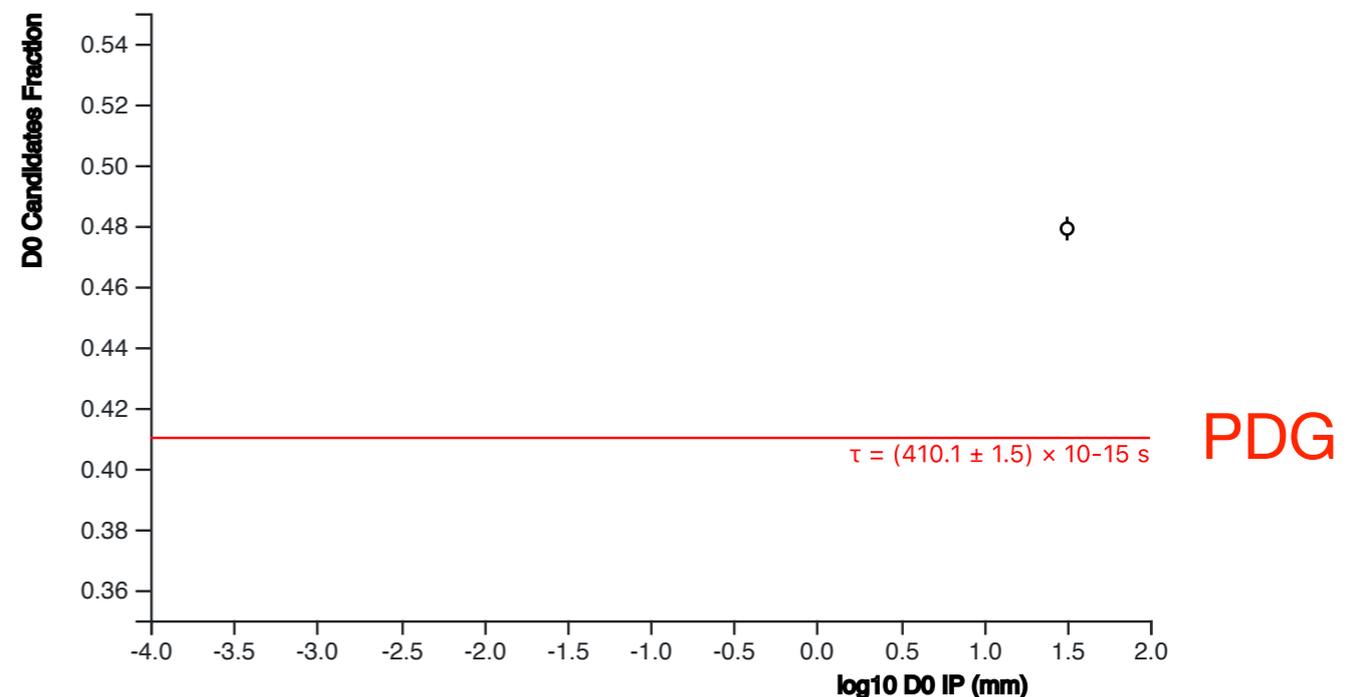
Fit result (ps)	Fit Error
0.479	0.0039

Save result



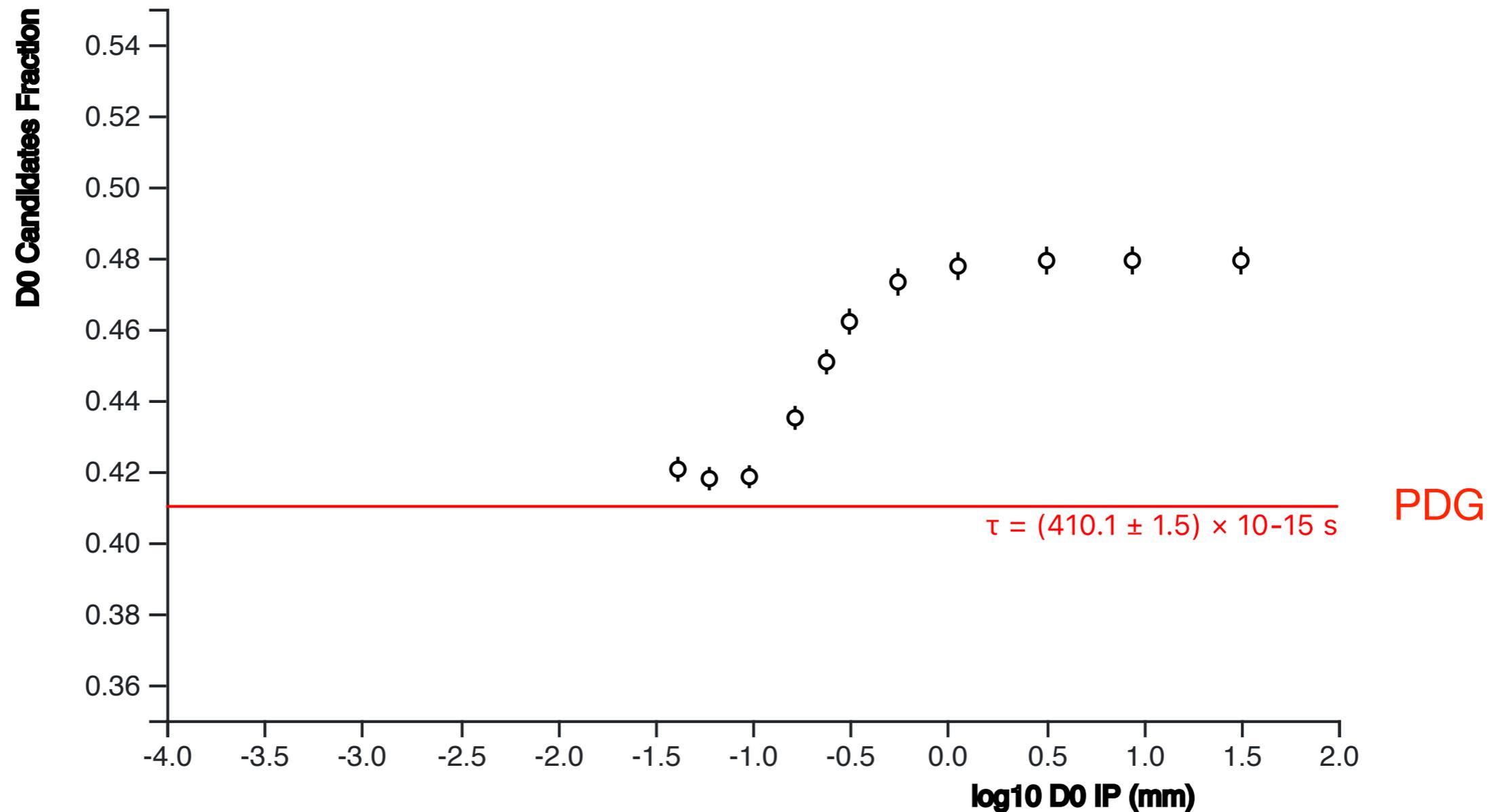
Il valore del fit viene aggiunto nel grafico in basso a destra

Continuate ad abbassare IP a step di 0.2 e ripetete il fit salvando i risultati



Risultato

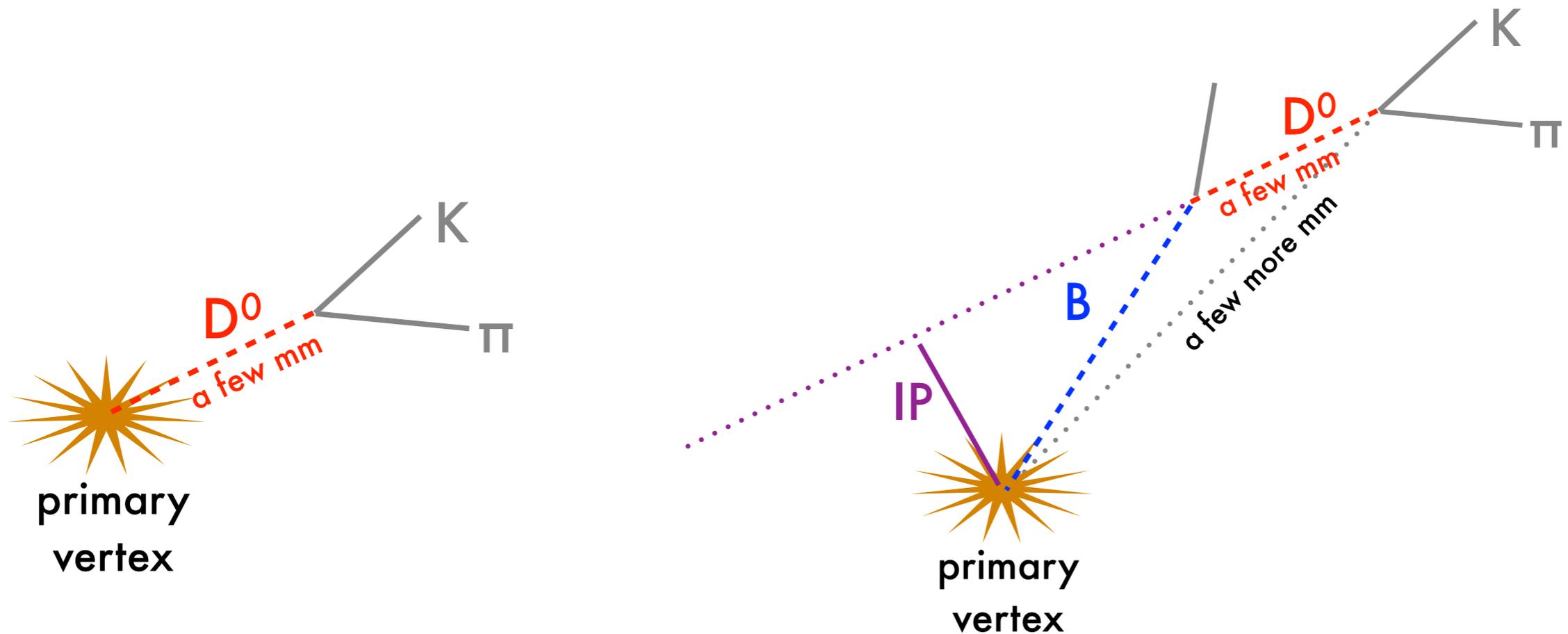
La vita media dal fit diminuisce riducendo il parametro d'impatto, perché?



HINT: come vengono prodotti i D^0 ?

Produzione del D^0

Nella produzione secondaria stiamo sommando le vite medie, ottenendo un valore **sistematicamente** più alto

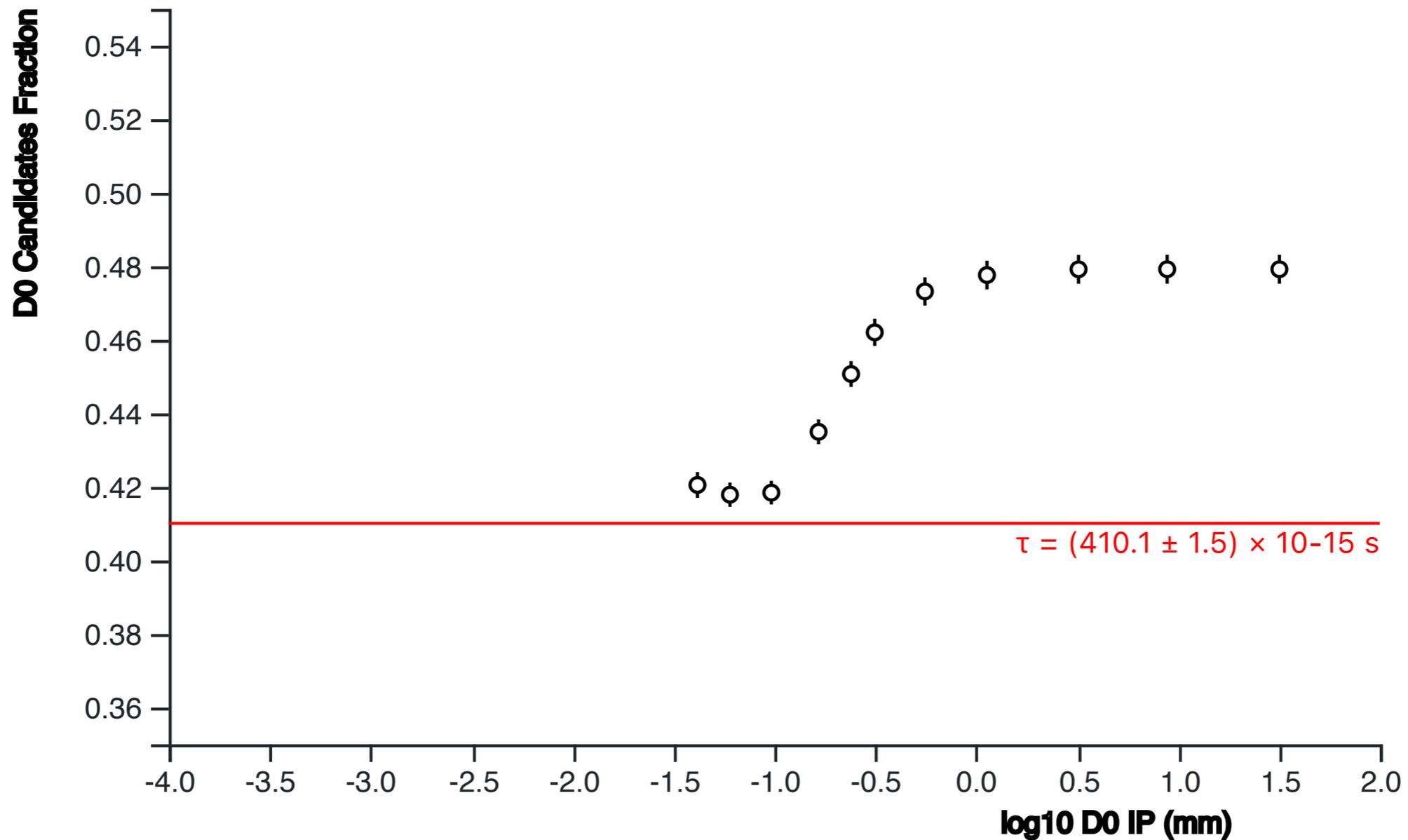


Produzione diretta

Produzione secondaria

Riducendo IP stiamo rimuovendo gli eventi in cui il D^0 proviene dal decadimento di un B !

Ci avviciniamo al valore corretto!



Riducendo l'IP il risultato si avvicina a quello del PDG.
Restano alcuni **errori sistematici** che non abbiamo considerato